

**VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky**

**Návrh modelu přenosové cesty systému LTE pomocí Vienna LTE  
Link Level Simulator**

**LTE Transmission Path Model Proposal using Vienna LTE Link  
Level Simulator**

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Kamil Ružák**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Návrh modelu přenosové cesty systému LTE pomocí Vienna LTE Link Level Simulator**  
**LTE Transmission Path Model Proposal using Vienna LTE Link Level Simulator**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popište vlastnosti fyzické vrstvy systému LTE a celého přenosového řetězce.
2. Navrhněte model přenosové cesty systému LTE pomocí Vienna LTE Link Level Simulator.
3. Řešení otestujte a srovnajte s naměřenými hodnotami.

Seznam doporučené odborné literatury:

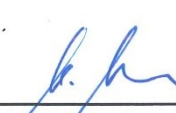
- [1] Ikuno, J.C.; Wrulich, M.; Rupp, M., "System Level Simulation of LTE Networks," *Vehicular Technology Conference (VTC 2010-Spring)*, 2010 IEEE 71st, vol., no., pp.1,5, 16-19 May 2010  
doi: 10.1109/VETECS.2010.5494007
- [2] CHRISTIAN MEHLFUHRER, Markus Rupp. *Evaluation of hsdpa and lte from testbed measurements to system level performance*. Hoboken, N.J: Wiley, 2014. ISBN 978-111-9960-881.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Libor Michalek, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015

Datum odevzdání: 29.04.2016

  
doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.  
vedoucí katedry

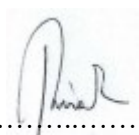


  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *25. dubna 2016*

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce **Ing. Liborovi Michalkovi, Ph.D.** za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této práce.

## **Abstrakt**

Účelem této diplomové práce je popis technologie Long Term Evolution, tedy technologie pro vysokorychlostní přenos dat v mobilních sítích. Dále zde budou popsány principy fungování fyzické vrstvy a přenosového řetězce. Navrhnutí modelu přenosového řetězce pomocí softwaru Vienna LTE Link Level Simulator v programu Matlab and Simulink od firmy MathWorks a následné otestování řešení a porovnání naměřených hodnot.

## **Klíčová slova**

4G, BER, Frekvence, Fyzická vrstva, LTE, Matlab, OFDM, Propustnost, SC-FDMA, Simulator, Simulink, SNR, Vienna

## **Abstract**

The purpose of this work is a description of Long Term Evolution, a technology for high-speed data transfer in mobile networks. In addition, there will be described principles of operation and physical layer transmission chain. Designing a model of the transmission chain with software Vienna LTE Link Level Simulator in Matlab and Simulink from MatchWorks and subsequent testing solutions and comparing the measured values.

## **Key words**

4G, BER, Frequency, Physical layer, LTE, Matlab, OFDM, Bandwidth, SC-FDMA, Simulator, Simulink, SNR, Vienna

# Obsah

Seznam použitých symbolů.....	- 9 -
Seznam použitých zkratek.....	- 10 -
Seznam ilustrací a seznam tabulek.....	- 13 -
Úvod.....	- 15 -
1 Long Term Evolution.....	- 16 -
1.1 Princip systému.....	- 16 -
1.2 Parametry.....	- 17 -
1.3 Metody přístupu.....	- 18 -
1.3.1 OFDM.....	- 18 -
1.3.2 SC-FDMA.....	- 19 -
1.4 Architektura sítě.....	- 20 -
1.4.1 E-UTRAN.....	- 21 -
1.4.2 UE.....	- 22 -
1.4.3 MBMS.....	- 22 -
1.4.4 EPC.....	- 23 -
1.4.5 SGW.....	- 23 -
1.4.6 PGW, PCRF.....	- 24 -
1.4.7 Tok dat v LTE.....	- 24 -
1.5 Komunikace mezi eNodeB a UE.....	- 24 -
1.6 Technologie MIMO.....	- 26 -
1.7 Přenosové rádiové kanály.....	- 26 -
1.7.1 AWGN kanál.....	- 26 -
1.7.2 Flat Rayleigh kanál.....	- 27 -
1.8 Typy přenosových kanálů.....	- 27 -
1.8.1 Fyzické kanály LTE.....	- 28 -
1.8.2 Transportní kanály LTE.....	- 28 -
1.8.3 Logické kanály LTE.....	- 29 -
1.9 Měřené parametry ovlivňující kvalitu sítě.....	- 29 -
1.9.1 AMC.....	- 29 -
1.9.2 SNR.....	- 30 -
1.9.3 BLER.....	- 31 -

1.9.4	Měření UE .....	- 31 -
1.9.4.1	RSSI.....	- 31 -
1.9.4.2	RSRQ.....	- 31 -
1.9.4.3	RSRP .....	- 32 -
1.9.5	Měření eNodeB .....	- 33 -
1.9.5.1	Downlink RS Tx Power.....	- 33 -
1.9.5.2	TNP .....	- 33 -
1.9.5.3	RIP.....	- 33 -
2	Návrh přenosového modelu .....	- 34 -
2.1	Popis simulátoru.....	- 35 -
2.1.1	Blok data.....	- 35 -
2.1.2	Blok konvoluční kódování .....	- 35 -
2.1.3	Blok prokládání .....	- 36 -
2.1.4	Blok mapování .....	- 36 -
2.1.5	Blok modulace.....	- 36 -
2.1.6	Blok sériově/paralelní převod.....	- 36 -
2.1.7	Blok IFFT .....	- 36 -
2.1.8	Blok paralelně/sériový převod.....	- 36 -
2.1.9	Blok vložení cyklického prefixu .....	- 36 -
2.2	Grafické rozhraní .....	- 37 -
2.3	Časová náročnost simulací .....	- 38 -
3	Výsledky simulací .....	- 40 -
3.1	Frekvence 800 MHz, šířka kanálu 3 MHz .....	- 40 -
3.2	Frekvence 800 MHz, šířka kanálu 5 MHz .....	- 42 -
3.3	Frekvence 800 MHz, šířka kanálu 10 MHz .....	- 43 -
3.4	Frekvence 800 MHz, šířka kanálu 20 MHz .....	- 45 -
4	TEMS Software.....	- 47 -
4.1	Měření při CQI 8.....	- 48 -
4.2	Měření při CQI 15.....	- 49 -
5	Zhodnocení naměřených výsledků.....	- 50 -
	Závěr.....	- 51 -
	Použitá literatura .....	- 52 -
	Seznam příloh.....	- 54 -



## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>RIP</b>	dBm	Received Interference Power
<b>RS Tx Power</b>	W	Reference Signal Transit Power
<b>RSRP</b>	dBm	Reference Signal Receive Power
<b>RSRQ</b>	dB	Reference Signal Receive Quality
<b>RSSI</b>	dBm	Received Signal Strength Indicator
<b>SNR</b>	dB	Signal-to-Noise ratio
<b>TNP</b>	dBm	Termal Noise Power

## Seznam použitých zkratk

Zkratka	Význam
<b>16QAM</b>	16-Quadrature Amplitude Modulation
<b>3GPP</b>	3rd Generation Partnership Project
<b>4G</b>	Fourth generation (LTE)
<b>64QAM</b>	64-Quadrature Amplitude Modulation
<b>AMC</b>	Adaptive Modulation and Coding
<b>ARQ</b>	Automatic Repeat Request
<b>AWGN</b>	Additive white Gaussian noise
<b>BER</b>	Bit Error Rate
<b>BLER</b>	Block Error Rate
<b>BPSK</b>	Binary Phase-Shift Keying
<b>CDMA</b>	Code-Division Multiple Access
<b>CINR</b>	Carrier to Interference-plus-Noise Ratio
<b>CN</b>	Core Network
<b>CQI</b>	Channel Quality Indicator
<b>CS</b>	Circuit Switched
<b>DVB</b>	Digital Video Broadcasting
<b>ECC</b>	Error Checking and Correcting
<b>E-MBMS</b>	Enhanced MBMS
<b>eNodeB</b>	Evolved Node B
<b>EPC</b>	Evolved Packet Core
<b>EPS</b>	Evolved Packet System
<b>E-UTRAN</b>	Evolved Terrestrial Radio Access Network
<b>FDD</b>	Frequency Division Duplex
<b>FDMA</b>	Frequency Division Multiple Access
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>HARQ</b>	Hybrid automatic repeat request
<b>HD</b>	High definition
<b>HFDD</b>	Half Frequency Division Duplex

<b>HSPA</b>	High Speed Packet Access
<b>HSPA+</b>	Evolved High Speed Packet Access
<b>IMS</b>	IP Multimedia Subsystem
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>ISDN</b>	Integrated Services Digital Network
<b>LTE</b>	Long Term Evolution
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MBMS</b>	Multimedia Broadcast Multicast Services
<b>MBMS GW</b>	MBMS gateway
<b>MBSFN</b>	Multi-Media Broadcast over a Single Frequency Network
<b>MCE</b>	Multicell/Multicast Coordination Entity
<b>MCS</b>	Modulation and Coding Scheme
<b>MIMO</b>	Multiple Input-Multiple Output
<b>MME</b>	Mobility Management Entity
<b>NAS</b>	Non-Access Stratum
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
<b>OFDMA</b>	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
<b>PARP</b>	Peak-to-Average Power Ratio
<b>PCRF</b>	Policy and Charging Rules Function
<b>PDCP</b>	Packet Data Convergence Protocol
<b>PDU</b>	Protocol Data Unit
<b>PGW</b>	Packet Data Network Gateway
<b>PSTN</b>	Public Switched Telecommunication Networks
<b>PHY</b>	Physical layer
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>QAM</b>	Quadrature Amplitude Modulation
<b>QPSK</b>	Quadrature Phase-Shift Keying
<b>RAN</b>	Radio Access Network
<b>RE</b>	Resource Elements
<b>RB</b>	Resource Block
<b>RIP</b>	Received Interference Power

---

<b>RLC</b>	Radio Link Control
<b>ROHC</b>	Robust Header Compression
<b>RRC</b>	Radio Resource Control
<b>RS</b>	Reference Signals
<b>RSRP</b>	Reference Signal Receive Power
<b>RSRQ</b>	Reference Signal Receive Quality
<b>RSSI</b>	Received Signal Strength Indicator
<b>RS Tx Power</b>	Reference Signal (RS) Transit Power
<b>S/N</b>	Signal-to-noise Ratio
<b>SAE</b>	System Architecture Evolution
<b>SC-FDMA</b>	Single-Carrier Frequency Division Multiple Access
<b>SDM</b>	Space-Division Multiplexing
<b>SDMA</b>	Space-Division Multiple Access
<b>SDU</b>	Service Data Unit
<b>SFN</b>	Single Frequency Network
<b>S-GW</b>	Serving Gateway
<b>SINR</b>	Signal-to-Interference plus Noise Ratio
<b>SNR</b>	Signal-to-Noise Ratio
<b>TDD</b>	Time-Division Duplex
<b>TDM</b>	Time-Division Multiplexing
<b>TDMA</b>	Time-Division Multiple Access
<b>TE</b>	Terminal Equipment
<b>TNP</b>	Termal Noise Power
<b>TTI</b>	Transmission Time Interval
<b>UE</b>	User equipment
<b>UMB</b>	Ultra Mobile Broadband
<b>UMTS</b>	Universal Mobile Telecommunication System
<b>USIM</b>	Universal Subscriber Identity Module
<b>VoIP</b>	Voice over Internet Protocol
<b>Wi-Fi</b>	Wireless LAN
<b>WiMAX</b>	Worldwide Interoperability for Microwave Access

---

## Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo ilustrace	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	OFDM Multiplex	19
1.2	Architektura LTE sítě	20
1.3	Přístupová síť E-UTRAN	21
1.4	MBMS komunikace	23
1.5	Tok dat v síti	24
1.6	Architektura rádiového rozhraní	25
1.7	AWGN kanál	27
1.8	flat Rayleigh kanál	27
1.9	Kanálová architektura	28
2.1	Návrh přenosového modelu LTE	34
2.2	Grafické rozhraní simulátoru	38
2.3	Časová náročnost simulací	39
3.1	Propustnost, šířka 3 MHz, frekvence 800 MHz	41
3.2	Chybovost, šířka 3 MHz, frekvence 800 MHz	41
3.3	Propustnost, šířka 5 MHz, frekvence 800 MHz	42
3.4	Chybovost, šířka 5 MHz, frekvence 800 MHz	43
3.5	Propustnost, šířka 10 MHz, frekvence 800 MHz	44
3.6	Chybovost, šířka 10 MHz, frekvence 800 MHz	44
3.7	Propustnost, šířka 20 MHz, frekvence 800 MHz	45
3.8	Chybovost, šířka 20 MHz, frekvence 800 MHz	46
4.1	Lokalita měření	47
4.2	Parametry eNodeB	48
4.3	Kvalita signálu	48
4.4	Propustnost CQI 8	48
4.5	Použitá modulace	48
4.6	Kvalita signálu	49
4.7	Propustnost CQI 15	49
4.8	Použitá modulace	49

Číslo tabulky	Název tabulky	Číslo stránky
<b>1.1</b>	Základní parametry LTE	17
<b>1.2</b>	Závislost šířky pásma kanálu na dalších parametrech	19
<b>1.3</b>	Modulační schémata a úrovně CQI	30
<b>1.4</b>	Rozsah hodnot RSSI	31
<b>1.5</b>	Rozsah hodnot RSRQ	32
<b>1.6</b>	Rozsah hodnot RSRP	32
<b>2.1</b>	Časová náročnost simulací	38

---

## Úvod

Systém LTE je mobilní systém nové generace, který vylepšuje stávající mobilní přenosy. Tato diplomová práce se bude zabývat nejnovější generací návrhu mobilní sítě, kde bude postupně popsána fyzická vrstva LTE systému a také celého přenosového řetězce. Tento systém je stále v rozvoji a přicházejí nové standardy. Je nutné zde neustále sledovat vývoj.

Nová síť umožňuje další rozšíření služeb s velkou rychlostí v řádek stovek Mbit/s. Technologie přispěla k většímu rozšíření rychlého mobilního internetu. Rozdíl mezi pevným připojením a mobilním připojením se zmenšil natolik, že je možné používat v místě s pokrytím mobilní internet, jako internet připojený přes pevný kabel.

Fyzická vrstva LTE se skládá ze 4 částí, Fyzických kanálů a modulací, Multiplexování a kanálové modulace, Procedur a Měření na fyzické vrstvě. Tyto normy popisuje standard, který vydává společnost 3GPP, kde jsou uvedeny aktuální specifikace. Budou popsány použité modulace, vlastnosti systému a další principy fungování systému.

V další části diplomové práce bude navrhnutý model přenosového řetězce pomocí modifikací konfiguračních souborů Vienna LTE Link Level Simulator v aplikaci Matlab R2014a. Pro přehlednější ovládání simulace bude vytvořeno grafické rozhraní v anglickém jazyce pro možné využití simulátoru pro cizojazyčné studenty. Výsledky budou interpretovány v grafech. Budou se simulovat a měřit dvě z nejdůležitějších hodnot. Chybovost a propustnost, kde tyto dvě hodnoty ovlivňují kvalitu sítě.

Poté bude nutné ověřit funkčnost na reálné síti, pomocí mobilního telefonu Sony Xperia V (LT25i), který podporuje simulované LTE frekvence. Na telefonu je předinstalovaný TEMS<sup>TM</sup> Pocket Software pro měření a analýzu parametrů pro měření na reálné LTE síti.

Bude nutné co nejpresněji nasimulovat hodnoty v reálném prostředí, které se porovnají se simulátorem. Operátoři České republiky používají frekvence na frekvenčních přidělech 800MHz, 1800 MHz, 2100 MHz a 2600 MHz.

Je nutné zvolit takovou lokalitu, na které je daná frekvence k dispozici. Podle dosavadních zkušeností, by měly být naměřené hodnoty horší, z důvodu větší vytíženosti reálné sítě. Počet mobilních stanic připojených k eNodeB bude větší než v simulátoru, proto by měly být hodnoty rychlosti menší. Hodnoty budou také ovlivněny rušením a většími odrazy.

# 1 Long Term Evolution

Long Term Evolution je technologie použitá v nové generaci vysoce výkonného bezdrátového rozhraní pro buňkové komunikační systémy. Je to poslední mezikrok k sítím čtvrté generace. Které jsou především navrženy ke zvýšení kapacity a rychlosti mobilních sítí. Technologie LTE je kompatibilní s technologiemi druhé a třetí generace mobilních sítí. A také s nebuňkovými systémy, Wi-Fi (Wireless Fidelity) a WiMAX (World Interoperability for Microwave Access).

Mnoho světových a národních operátorů upgradují sítě co nejrychleji, aby zákazníkům poskytli co nejrychlejší a nejstabilnější síť. Tento přechod je velmi finančně náročný, protože tento systém přichází s novou verzí rádiového rozhraní eNodeB. V České republice nasazují síť LTE ve velkém měřítku všichni tři operátoři, a to na frekvencích 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz a 2100 MHz. Plánuje se i nasazení sítě na 2600 MHz a první sítě jsou již v pilotním provozu.

Organizace 3GPP, která dohlížela na vývoj buňkových sítí, začala pracovat na evoluci buňkové sítě seminářem, který odstartoval práce na novém standardu v roce 2004 v Torontu. Základní specifikace jsou zahrnuty ve standardu Release 8. Základními požadavky byly rozumná spotřeba energie, zjednodušení architektury a otevřenosti rozhraní, zvýšení dostupnosti služeb za menší cenu. Flexibilita použitím existujících, ale i nových frekvenčních pásem.

ITU-R IMT Advanced definuje požadavky na síť čtvrté generace. Tyto sítě musí mít přenosovou rychlost alespoň 100 Mbit/s při vysoké rychlosti koncového zařízení a 1 Gb/s při nízké mobilitě, resp. pokud koncové zařízení je v klidu vůči zemi [1]. Také musí podporovat šířku pásma do 40 MHz. Sítě 4G jsou založeny pouze a výhradně na IP přenosu, díky kterému je možné zákazníkům daných sítí poskytovat hlas pouze přenášený přes IP protokol. Kde je zapotřebí velmi malých latencí, řádově jednotky až desítky ms.

Další nespornou výhodou rychlého přenosu dat, je možnost nabídnout stream HD videa. Tyto požadavky musí být splněny v nástavbách nových technologií, které spadají do 4G technologie. LTE už dostalo nástupce v podobě LTE-Advanced, který vylepšuje rychlosti přenosu. Je kompatibilní se staršími zařízeními, které ale nebudou dosahovat takových vylepšených rychlostí přenosu, jako nové zařízení. Standard WiMAX (802.16e) je nahrazen vylepšeným standardem 802.16m. Standard CDMA2000 měl být nahrazen standardem UMB (Ultra Mobile Broadband), ale hlavní tahoun tohoto standardu Qualcomm ukončil tento vývoj, protože nemělo smysl vyvíjet technologie pro dva standardy a proto zanikl [2].

## 1.1 Princip systému

Tento systém používá ve směru downlink přístupovou techniku OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), která je velmi vhodná pro dosažení velkých přenosových rychlostí v širokopásmovém spektru. LTE využívá škálovatelnou šířku pásma rádiového kanálu od 1,4 do 20 MHz.

Ve směru uplink se OFDM nepoužívá, protože má za následek zvýšení špičkového a průměrného výkonu signálu (PARP – Peak to Average Power Ratio). Hodnota PARP je kompromis mezi efektivitou výkonu a životností baterie, což je velmi důležitý aspekt v používání mobilního



zařízení. Z tohoto důvodu používá princip přístupu SC-FDMA (Single-Carrier FDMA), který je velmi podobný OFDM, ale má nižší o 2 až 6 dB PARP.

Cíle pro přenosová pásma definovaná podle Release, jsou rychlosti LTE 100 Mbit/s pro downlink a pro uplink 50 Mbit/s pro každé 20 MHz spektrum. Další předností je podpora minimálně 200 aktivních uživatelů v každém 5 MHz pásmu a velmi malé časy odezvy kolem 10 ms. Kde pro používání VoIP a hraní online her je to důležitý parametr[3].

## 1.2 Parametry

V tabulce 1.1, jsou základní a nejdůležitější údaje o systému LTE [2].

Maximální rychlost Downlink 64-QAM	100 Mbit/s (SISO), 172,8 Mbit/s (2x2MIMO), 326 Mbit/s (4x4 MIMO)
Maximální rychlost Uplink	50 Mbit/s (QPSK), 57,6 Mbit/s (16-QAM), 86 Mbit/s (64-QAM)
Šířka pásma FDD	1,4; 3; 5; 10; 15; 20 MHz
Šířka pásma TDD	1,6; 3,2 MHz
Odezva	10 ms
Spektrální účinnost	5 bit/s/Hz
Režimy	FDD, HFDD, TDD
Modulace	QPSK, 16-QAM, 64-QAM
Přístupová technika Downlink	OFDM
Přístupová technika Uplink	SC-FDMA
Max. velikost buňky	100 km
Max. rychlost pohybu UE	500 km/h
Délka rámce	10 ms
Délka slotu	0,5 ms
Délka užitečných dat	66,67 $\mu$ s
Délka cyklického prefixu	4,69/16,67 $\mu$ s
Délka OFDM symbolu	71,36/83,33 $\mu$ s
Odstup subnosných	15 kHz
Počet subnosných	72, 144, 300, 600, 900, 1200
Přidělování subnosných	Lokalizované
Počet subnosných v resource bloku	12
Délka resource bloku	0,5 ms
Kódování FEC	Konvoluční s $R = 1/3$ ,
	Turbo kódy s $R = 1/3$

Tabulka 1.1: Základní parametry LTE

### 1.3 Metody přístupu

Hlavní klíčový prvek LTE je použití Ortogonálního frekvenčního děleného multiplexu (OFDM) a jeho přístupových metod OFDMA a SC-FDMA. OFDM je typ vícekanálové modulační metody, která využívá velké množství blízko rozmístěných kanálů, modulovaných nízkou rychlostí. Podle rozmístění signálů ortogonálně mezi sebou, nedochází k vzájemnému rušení. Je to v důsledku vytvořením těchto kanálů s velikostí rovnu symbolové periody. Tj. že pokud jsou signály demodulované, v symbolové periodě mají celý řád cyklů, ale jejich informační hodnota je nula. Nemají tedy žádný přínos pro spojení. Data na přenos jsou rozdělena do všech kanálů. Pokud jsou nějaké data nedoručená a ztracená kvůli vícecestným vlivům, tak za použití metod na opravu chyb, můžou být data následně rekonstruována.

Přenos dat při nízké rychlosti na všech kanálech znamená, že vliv mezisymbolové interference a odrazů může být zanedbatelný. Toto je využitelné při sítích pracujících na jedné frekvenci, kde všechny vysílače můžou vysílat na stejném kanálu. Odstup subnosných je 15 kHz. Výsledkem dostaneme symbolovou rychlost  $1/15 \text{ kHz} = 66,7 \text{ } \mu\text{s}$  pro udržení ortogonalitu. Každý tento subnosný kanál je schopný výpočtem přenést 15 kilosymbolů za sekundu. PRB (Physical Resource Blok) je nejmenší přenosová jednotka v časově-frekvenční oblasti. Zabírá blok 12 subnosných po 15 kHz za čas 0,5 ms. Všechny uváděné rychlosti jsou pouze teoretické a neberou v potaz kódování ani kontrolní hlavičky.

V případě, že nastane mezisymbolová interference, je do časování vložena ochranná perioda mezi jednotlivé symboly. Díky tomuto opatření dokáže přijímač navzorkovat přijatý signál na optimální čas vysílání a vytvořením mezisymbolové interference způsobené zpožděním odrazem. V LTE je symbolová délka nastavena na 66,7  $\mu\text{s}$  a k tomu je upravena i délka cyklického prefixu na 4,69  $\mu\text{s}$ . Tímto je možné systému přizpůsobit se různým odrazům až do vzdálenosti 1,4 km [3].

#### 1.3.1 OFDM

OFDM signál je složený maximálně z 1200 různých subnosných s rozestupem 15 kHz. Jsou navzájem ortogonální a na každou subnosnou se modulují jednotlivé symboly. Vysílání symbolů probíhá paralelně a tím pádem se zvětší přenosové rychlosti pro konstantní délku symbolu. Použitím ISI (Inter Symbol Interference) za pomoci vkládání ochranných intervalů jsou eliminovány interference. Základnová stanice může podporovat pouze 72 subnosných (pro šířku kanálu 1,4 MHz), ale mobilní telefony musí podporovat všech 1200 subnosných (pro šířku kanálu 20 MHz).

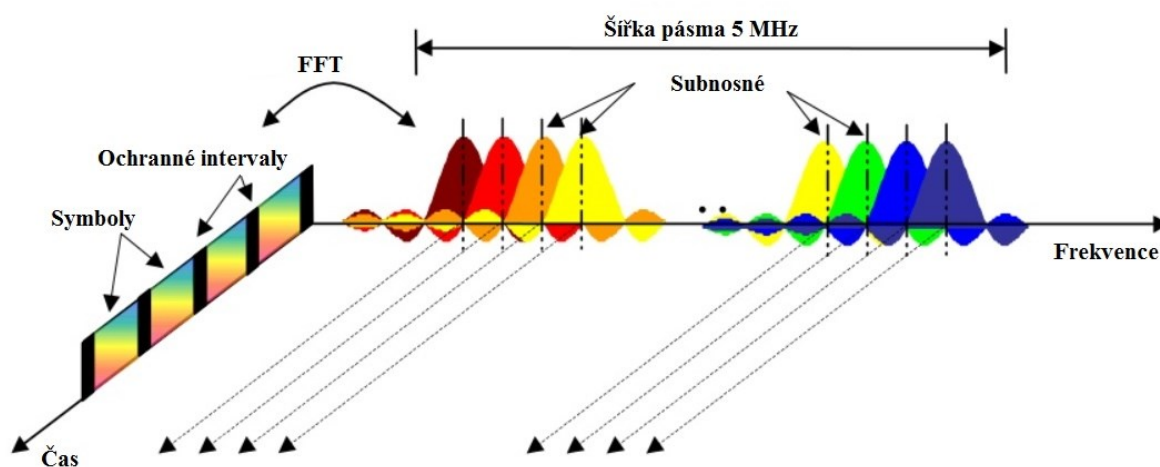
Díky tomu jsou mobilní telefony schopny se spojit s jakoukoliv základnovou stanicí na podporované frekvenci. Je použita inverzní rychlá Fourierova transformace (IFFT). Signál ve vysílači je definován softwarově ve frekvenční oblasti. Modulátorová soustava je nahrazena IFFT procesorem.

V OFDM signálu je možné modulovat jednotlivé subnosné při třech režimech:

- QPSK = 2 bity na symbol
- 16-QAM = 4 bity na symbol
- 64-QAM = 6 bitů na symbol

Při menších rychlostech modulační rychlosti nevyžadují tak velký odstup signál-šum (SNR). V případech dostatečně velkého SNR se používají vyšší modulační rychlosti. V downlink směru jsou subnosné rozděleny do zdrojových bloků. To umožňuje data rozmístit mezi standardní počet subnosných. 12 subnosných tvoří jeden zdrojový blok bez ohledu na šířku pásma. V časovém rámci se vytváří jeden časový slot. Tím pádem má každé spektrum rozdílný počet zdrojových bloků, viz tabulka 1.2. Na obrázku 1.1, ukázka OFDM ve frekvenční a časové doméně [4].

Na fyzické vrstvě se přenáší rámec (frame), který má parametry: čas rámce 10 ms, jeden rámec obsahuje 10 subrámců, každý s délkou 1 ms, subrámec je dělen na 2 kanálové intervaly, interval obsahuje 6 nebo 7 OFDM symbolů podle použitého CP (Channel Prefix) [4].



Obrázek 1.1: OFDM Multiplex

Šířka pásma kanálu [MHz]	1,4	3	5	10	15	20
Šířka pásma pro data [MHz]	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18
Vzorkovací kmitočet [MHz]	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
PRB [Physical Resource Block]	6	15	25	50	75	100
Počet subnosných	72	180	300	600	900	1200
Velikost FFT	128	256	512	1024	1536	2048

Tabulka 1.2: Závislost šířky pásma kanálu na dalších parametrech

### 1.3.2 SC-FDMA

V uplink směru je použita jiná metoda, tou je upravená SC-FDMA, která vychází z části metody OFDM. Jeden z nejdůležitějších parametrů, určující použitelnost mobilního zařízení je výdrž baterie. Proto se používá jiná metoda přístupu než je OFDM. Největší spotřeba u rádiové části mobilního telefonu je radiofrekvenční zesilovač, který přenáší signál přes anténu k základové stanici. Proto je potřebné, aby mohl pracovat co nejvíce úsporně.

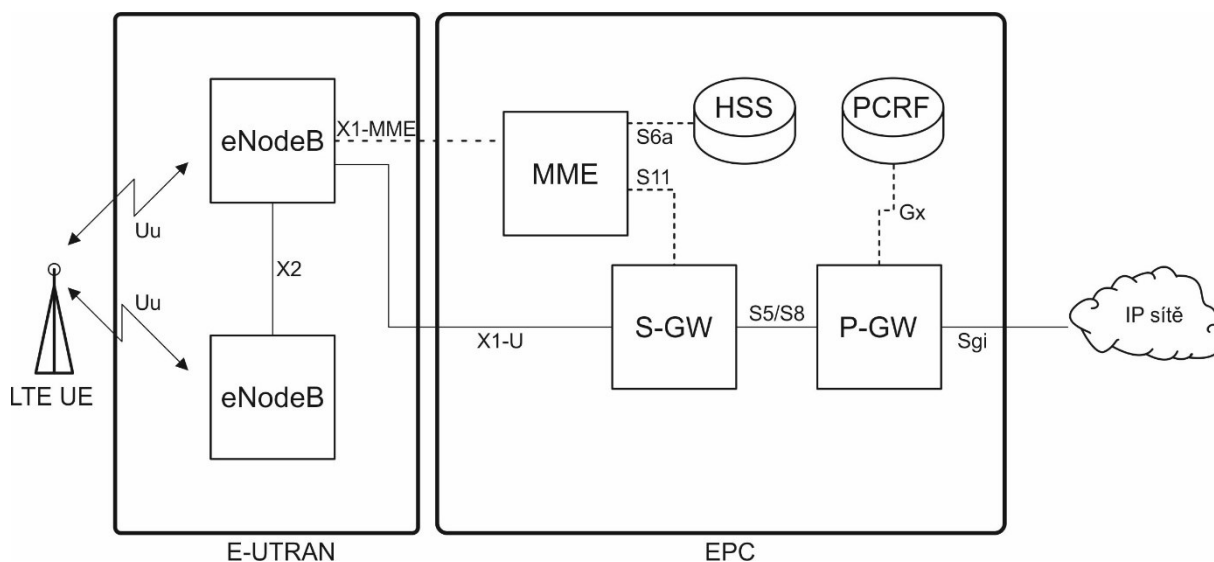
Toto je nejvíc ovlivněno typem frekvenční modulace a typem signálu. Signály, které mají velký PAPR a vyžadují lineární zesílení, nemůžou být použité jako efektivní radiofrekvenční zesilovače. Pomocí SC-FDMA je možné využít konstantní spotřebu, ale nemá tak velkou propustnost dat jako OFDM. Je to ten stejný typ hybridní modulace, která kombinuje nízký PAPR nabízený v systémech s jednou nosnou frekvencí. Odolností vůči vícecestnému interferenčnímu rušení a flexibilní přidělování subnosných frekvencí, které nabízí OFDM [4].

## 1.4 Architektura sítě

Architektura systému LTE na obr. 1.2. Je založená na paketovém spojení a nepodporuje starší technologii přepojování okruhů. 4G využívá takzvanou plochou architekturu, která je obsažena v Release 7 pro HSPA+. Byly sjednoceny jednotlivé bloky a oddělily se řídicí informace od samotného přenosu dat. Byla řádově snížena odezva systému a navýšila se přenosová rychlost.

Vylepšená architektura systému 4G je vybavena rádiovou přístupovou sítí E-UTRAN (Evolved-UTRAN), kde je zastoupena funkce ke komunikaci uživatelů se systémem. Paketová síť EPC (Evolved Packet Core) vycházející ze SAE (System Architecture Evolution), která reflektuje síť (CN) v systému UMTS. Uživatelská stanice je samostatným článkem systému.

Všechny tyto části komunikují pomocí IP protokolu a na tomto protokolu jsou založeny všechny dodávané služby. Systém LTE využívá doménu IMS (IP Multimedia Subsystem), především k podpoře hlasových služeb. Také poskytuje VoIP spojení s doménou CS (Circuit Switched) a s externími sítěmi (PSTN, ISDN) [5].



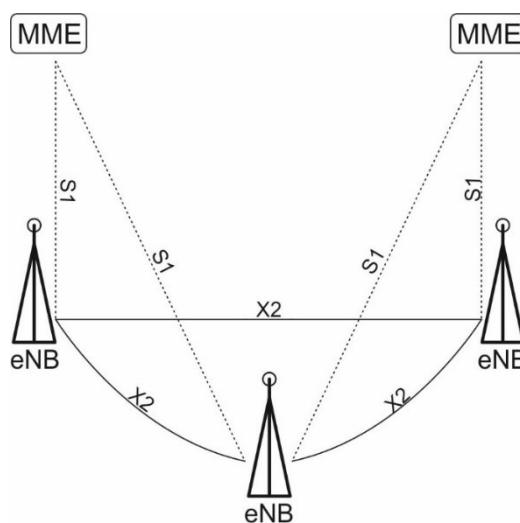
Obrázek 1.2: Architektura LTE sítě

### 1.4.1 E-UTRAN

Rádiová přístupová síť E-UTRAN obr. 1.3, zajišťuje uživatelům přístup ke službám, které obstarává paketová síť EPC, čímž zajišťuje spojení mezi UE (User Equipment) a EPC. Obsahuje základové stanice eNodeB. Vytvářejí základní pilíř systému a funkce, jako základové stanice a dále také řídicí jednotky rádiové sítě. Všechny eNodeB zajišťují rádiové kanály podle stanovených prioritních požadavků a požadované kvality služeb QoS.

Probíhá zde hromadné měření kvality signálu a s hodnotami z jednotky UE rozhodují o handoveru. Samostatné eNodeB jsou mezi sebou propojené pomocí rozhraní X2 a toto rozhraní je využíváno při handoveru. S EPC jsou eNodeB spojené přes rozhraní S1. Každá eNodeB by mohla obsluhovat několik UE, přitom ale pouze jedno UE může být obsluhované současně jen jednou eNodeB. UE je vždy propojené s jednou MME (Mobility Management Entity) a S-GW (Serving Gateway). eNodeB neustále monitoruje toto spojení.

Při spojení UE do sítě přes nově nalezené eNodeB, zajistí toto eNodeB směrování k MME se kterým bylo UE naposledy spojené. V případě, že není MME k dispozici např. z důvodu výpadku sítě anebo chybějí směrovací informace, eNodeB přiřadí nové MME. Důležitou funkcí je i mobility management, nebo-li sledování pohybu účastníka v síti [5].



Obrázek 1.3: Přístupová síť E-UTRAN

Rádiové rozhraní sítě E-UTRAN zabezpečuje rádiový přenos. Zajišťuje dynamické přidělování přenosové rychlosti na základě konkrétních přenosových podmínek. Uskutečňuje celkovou kontrolu rádiové části sítě. Jeho důležitou vlastností je šifrování přenášených dat a zabezpečení účinného využívání přiděleného spektra. Vykonává kompresi IP hlaviček paketů.

Všechny tyto funkce jsou zajišťovány přímo z eNodeB a každá z nich může být zodpovědná za řízení i více okolních buněk. To umožňuje efektivnější správu sítě, která bude mít pozitivní dopad na snížení latencí a větší efektivitě přenosu. Na rozdíl od UMTS je u LTE šířka pásma kanálů maximálně 20 MHz. Koncové zařízení (UE), tak budou mít k dispozici šest různých přenosových pásem daného kanálu, ve kterém bude přenášený přesně definovaný maximální možný počet RB – NRB. Tyto bloky

slouží na přenos uživatelských a řídicích dat sítě. Kolik bloků bude přidělených na přenos, to závisí od plánovacího mechanismu nastavení sítě, který rozděluje šířky pásem podle vytíženosti sítě. Plánovací mechanismus v LTE je podobný mechanismu použitého v sítích HSPA.

Použití dané šířky pásma závisí na kmitočtu, na kterém bude v daném stavu provozovaná daná LTE síť a to buď ve FDD, nebo TDD pásmu. Podle daného frekvenčního spektra, které má k dispozici, se většinou rozhoduje na základě hustoty obyvatelů v dané lokalitě. Čím bude větší hustota obyvatelů na km<sup>2</sup>, tím bude využívána větší šířka kanálu. Samostatný proces standardizace není jednoduchý, protože v různých částech světa se používají stejné mobilní sítě na různých kmitočtech. V Evropě je k dispozici 565 MHz spektrum dostupné pro mobilní operátory, které obsahuje kmitočty 800/1800/2100 MHz frekvenčního děleného multiplexu (FDD). V USA LTE využívá kmitočty 700/1700/2100 MHz a v Japonsku 800/1500/1700/2100 MHz [5].

### 1.4.2 UE

Uživatelský terminál UE je založený ze dvou základních jednotek. Z mobilní koncové jednotky TE (Terminal Equipment) a modulu pro identifikaci USIM (Universal Subscriber Identity Module). Terminal Equipment zajišťuje komunikaci přes rádiové rozhraní a dodává rozhraní pro uživatelské aplikace. Zajišťuje taky funkce mobility managementu, kdy poskytuje informace o handoveru a umístění terminálu. USIM slouží k identifikaci a autentizaci uživatele. Obsahuje nezbytné šifrovací a autorizační klíče, které jsou nutné pro zabezpečené přenosy na rádiovém rozhraní. UE může být také mobilní telefon anebo datová karta, použitá např. ve sledovacím zařízení v automobilu [6].

### 1.4.3 MBMS

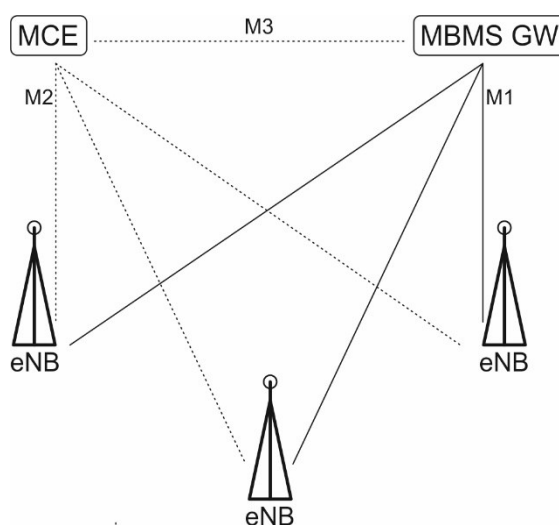
MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services) – multimediální rozhlasové a multicastové služby. Při jejich implementaci se uplatňují koncepce spektrální a energeticky velmi efektivních jednofrekvenčních vysílacích sítí SFN (Single Frequency Network). Využívaných také v digitální televizi DVB (Digital Video Broadcasting).

V LTE mohou MBMS přenosy být vytvořeny buď jako přenos v rámci jedné buňky anebo více buňek. Více buňkový přenos je synchronizovaný mezi buňkami a to umožňuje přijímacímu terminálu skombinovat signál přijatý z více buňek. A zlepšit tak SNR (Signal-to-Noise Ratio) v porovnání s konvekčním bod-multibod přenosem. Systém podporuje vylepšenou variantu E-MBMS (Enhanced MBMS). E-MBMS poskytuje přenos stejné informace určité skupiny uživatelů v rámci buňky, buď jen všem uživatelům (broadcast) anebo pouze k určité skupině uživatelů (multicast). IP multicast se může použít pro přenášení uživatelských dat z MBMS do eNB.

MBMS GW je zodpovědná za přenos do odlišných eNB v rámci společného území MBSFN (Multi-Media Broadcast over a Single Frequency Network) oblasti. MBMS GW je vstupní bod pro přicházející broadcast/multicast přenos. Jeho úlohou je posílání broadcast paketů do všech eNB v rámci oblasti poskytování služby (service area), jako i vykonávat management MBMS spojení (začátek a ukončení spojení). MCE (Multicell/Multicast Coordination Entity) je logická entita zodpovědná za přidělování časových a frekvenčních zdrojů (resources) pro vícebuňkový MBMS

přenos. Vykonává rozvrhnutí (scheduling) rádiového rozhraní a koordinaci přenosu z více buněk, viz obr. 1.4 [6].

- M1 rozhraní se používá pro doručení paketů MBMS do eNB prostřednictvím IP multicast protokolu
- M2 rozhraní se využívá pro poskytování dat o konfiguraci rádiového rozhraní jednotlivým eNB
- M3 rozhraní podporuje MBMS signalizaci pro řízení spojení (MBMS session control signalling), např. inicializované spojení a jeho ukončení mezi MCE a MME (E-UTRAN).



Obrázek 1.4: MBMS komunikace

#### 1.4.4 EPC

EPC (Evolved Packet Core) je komunikační jádro systému, zastřešující další subsystemy. Bylo navrženo z důvodu celkového snižování latencí sítě s ohledem na další zvyšování přenosových rychlostí a dalších rapidních růstů kapacity sítě. EPC pracuje plně na IP protokolu a komunikaci typu end-to-end. Dalším vylepšením je oddělení přenosu dat od obslužných informací, tím je dosaženo menší latence.

#### 1.4.5 SGW

SGW (Serving Gateway) je brána obsluhující jednotlivé eNodeB a jádrem sítě. Stará se o handover mezi eNodeB. Monitoruje informace a vyměňuje synchronizační data s UE. Pokud je UE v klidovém stavu, následně se probudí a zvýší výkon přijímaného signálu při přenosu dat. Stará se také o následné spojení v případě výpadku signálu. Uživatel pohybující se v síti je takzvaně zafixován mobilní kotvou do jádra přes stejnou SGW [5].

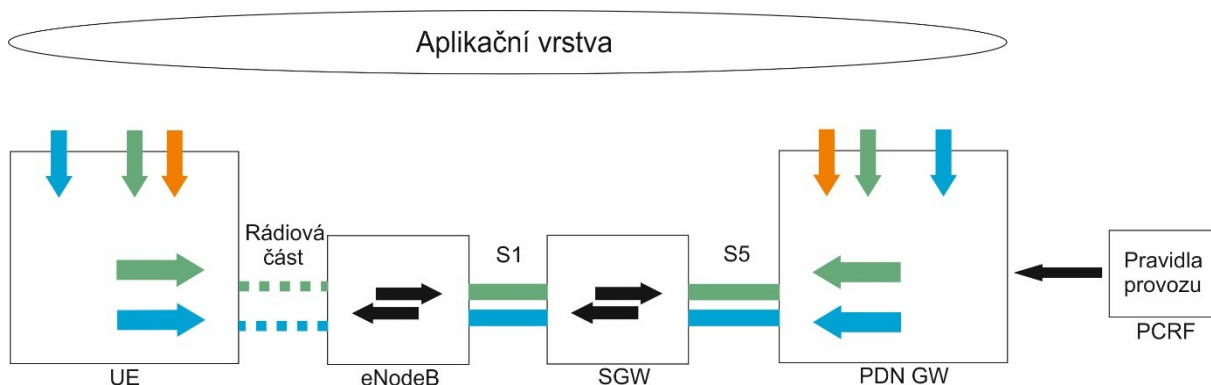
### 1.4.6 PGW, PCRF

PGW (Packet Data Network Gateway) je síťová brána paketových dat. Je to bod, který je koncový pro přenášena paketová data v rámci sítě. Probíhá zde filtrování paketů. Je zde možné i blokování nevhodného obsahu nebo omezení přístupu uživatelům na porty, které využívají p2p sítě apod. Pro zjišťování oprávněnosti vstupu do sítě a používání služeb kontaktuje PCRF.

PCRF (Policy and Charging Rules Function) řídí funkce pravidel přístupu a účtování služeb. Zajišťuje dynamické oprávnění měnící se v reálném čase a kontrolu účtování podle tarifu mobilního účastníka. [5].

### 1.4.7 Tok dat v LTE

Na obrázku 1.5, lze vidět graficky znázorněný tok dat v síti a tím možné zpoždění v jednotlivých částech sítě. Data z mobilního terminálu se přenášejí pomocí rádiové části na eNodeB, které je dále připojené přes datovou linku S1 na Serving Gateway. Je to brána do sítě pro eNodeB a další prvky sítě. Tato jednotka je připojena datovou linkou do síťové brány a dalších jednotek sítě. Brána je připojena k Policy and Charging Rules Function, kde jsou uloženy pravidla přístupu a provozu účastníků v síti [6].



Obrázek 1.5: Tok dat v síti

## 1.5 Komunikace mezi eNodeB a UE

Komunikace mezi koncovým zařízením a základnovou stanicí probíhá pomocí protokolů, které obstarávají přenos paketů. Fyzická vrstva nese informaci z MAC kanálu přes rádiové rozhraní. Zařizuje linkové přizpůsobení, probíhá zde kontrola linky, vyhledává začátek přenosu a měření stavu komunikace pro RRC vrstvu. Na obr. 1.6 je zobrazená architektura LTE E-UTRAN. MAC podvrstva nabízí použití logických kanálů RLC vrstvě, která multiplexuje pro fyzickou vrstvu transportní kanály. Zde probíhá také HARQ oprava chyb, určování priority logických kanálů pro UE a dynamické plánování mezi ostatními zařízeními [15].



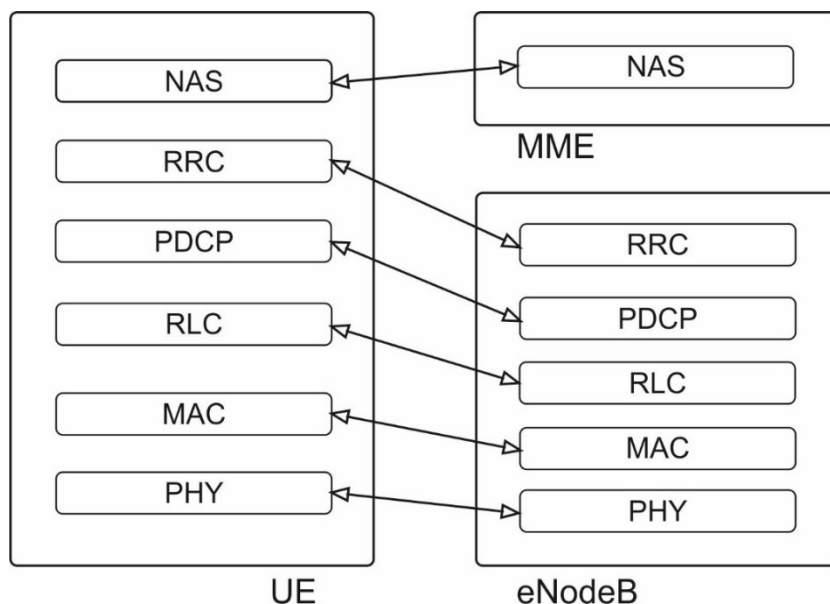
RLC podvrstva přenáší PDCP pakety v jednom ze tří módů přenosu podle potřeby spolehlivosti přenosu. Podle zvoleného typu módu přenosu zabezpečuje HARQ, rozdělení nebo sjednocení paketů z vyšší vrstvy pro jednoho příjemce a detekci duplicitního přenosu.

- Transparentní mód (TM) – nekontroluje se, nesegmentuje se, SDU se přepośle
- Nepotvrzený režim (UM) – z SDU se vytvoří PDU, které se už segmentuje a přidává se hlavička
- Potvrzený režim (AM) – z SDU se PDU, které se segmentuje, přidává se hlavička. Na přijímací straně v RLC vrstvě kontrolují zprávy a vyžaduje se opakované vyslání pomocí ARQ metod.

PDCP podvrstva zabezpečuje RRC vrstvě dopravení dat s ochranou integrity a šifrováním pro IP vrstvu přenosu paketů. Přidává kompresi ROHC hlavičky šifrováním a doručení v bloku. Probíhá zde detekce duplicitního přenosu a opakovaných vysílání vlastních SDU během doručení.

RRC podvrstva se stará o broadcastové systémové informace spojené s AS vrstvou a samotný transport NAS zpráv. Probíhá zde detekce stránkování, vytvoření a uvolnění RRC spojení, správa bezpečnosti, měření UE a aplikace QoS.

NAS je vrstvou na rozhraní. Je to použitý protokol mezi MME a UE na síťové straně (mimo EUTRAN). Má na starosti autentizaci UE, bezpečnost a pomocí této vrstvy se vytváří část stránkovacích zpráv [11].



Obrázek 1.6: *Architektura rádiového rozhraní*

## 1.6 Technologie MIMO

MIMO je metoda vícenásobného přístupu (vstupu i výstupu), která rapidně zlepšuje vlastnost celého systému. V závislosti na konfiguraci a optimalizaci takového systému zvyšuje propustnost a spektrální efektivitu. Následky Shannonového zákona jsou dva: *hlavní omezení komunikačních kanálů* a *vícecestné rušení datové propustnosti*. Využitím více antén a komplexnějšího zpracování digitálního signálu umožňuje systém nastavit více datových toků na stejném kanálu. Tento systém umí využít vícecestný signál na zlepšení propustnosti na daném kanálu v daném spektru mezi vysílačem a přijímačem.

Dělíme na tři typy: *Frekvenční různorodost* – při použití různých frekvencí, spojení různých technologií anebo kanálů. *Prostorová různorodost* – antény jsou v různých polohách na využití různých rádiových cest šíření v prostředí. *Časová různorodost* – data jsou přenesena v různých časech anebo pomocí rozdílného kódování kanálu.

Pro každou anténu je využití jiné cesty na přenos dat. Místo výskytu rušení jsou cesty použité pro zvýšení SNR. Nejvíce se používá technologie MIMO pro zvýšení kapacity linky. V systému se používá více modelů na přenos v downlink nebo uplink směru, záleží na konkrétní konfiguraci sítě. Je to z důvodu spotřeby energie koncového zařízení. Nejvíce používané schéma zapojení je 2x2, tedy využití dvou antén na základnové stanici a dvou na koncovém zařízení. Při směru uplink, tedy směrem z koncového zařízení, je využité schéma: *multi-uživatelský vícenásobný vstup/výstup* - MU-MIMO. Pouze pár nejvíce technologicky vyspělých koncových stanic má více než jednu anténu. Využívá se přenos od více uživatelů na stejném kanálu k anténám na základnové stanici. Tato metoda se jmenuje *vícenásobný přístup v prostorové oblasti* (SDMA) [2].

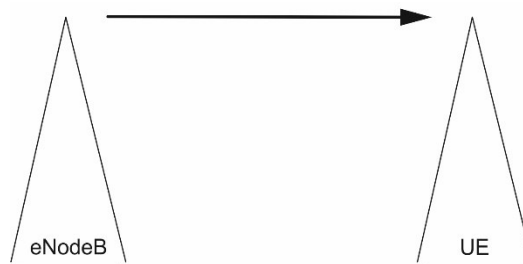
## 1.7 Přenosové rádiové kanály

V modelu přenosového řetězce jsou testovány a porovnávány dva modely přenosového rádiového kanálu. A to AWGN kanál a flat Rayleigh kanál. Existuje více typů přenosových kanálů, ale jsou otestovány dva, které dosahují nejlepších výsledků samotné propustnosti sítě. Dokážeme objektivně sledovat chybovost BLER a ověřit funkčnost přenosového modelu.

### 1.7.1 AWGN kanál

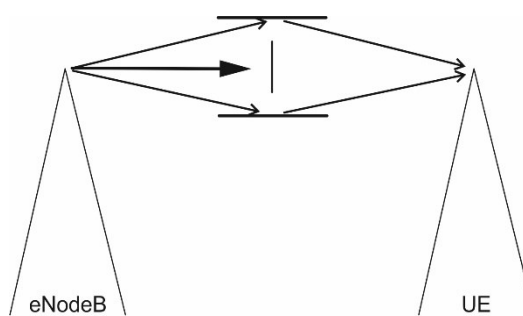
AWGN (Additive white Gaussian noise) kanál nebo takzvaný Gaussovský kanál se vyznačuje přímou cestou signálu bez dalších odrazů a do této cesty je přidáván aditivní Gaussovský šum. Tento šum primárně zhorší odstup signálu k šumu (S/N). Toto přidání šumu se nejvíce projevuje u vícecestavé modulace, tedy 64-QAM. Při výsledcích simulací je z grafů patrné, že při této modulaci nastane větší chybovost vlivem špatné detekce než u modulací, které jsou méně stavové. Na obrázku 1.7 je zobrazen kanál s přímou cestou signálu. V rovnici 1.1, vysílaný signál  $Y(t)$  a  $X(t)$ , je přijímaný signál doplněný o Gaussovský šum  $W(t)$ .

$$Y(t) = X(t) + W(t) \quad (1.1)$$

Obrázek 1.7: *AWGN kanál*

### 1.7.2 Flat Rayleigh kanál

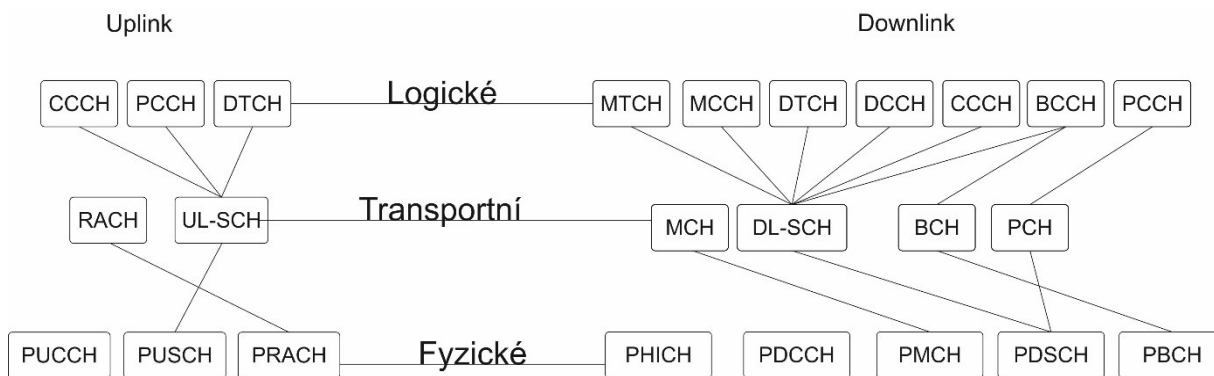
Flat Rayleigh je kanál, kde se nenachází žádná přímá cesta kanálu, obr. 1.8. Jsou zde pouze odrazy simulované tak, že pokud nastane jakékoliv množství odrazů na přenosovém modelu, tak u tohoto Rayleigh kanálu typu flat všechny odrazy dorazí na přijímač ve stejnou dobu. To je výhoda z hlediska simulace kanálu s odrazem. Výhodou je tedy menší náročnost simulace z důvodu absence dopočítávání zdrojového signálu z více časově na sobě nezávislých odrazů. Přijatý signál je součtem všech odrazů signálů, kde tyto odrazy mají stejný čas trvání signálu.

Obrázek 1.8: *flat Rayleigh kanál*

## 1.8 Typy přenosových kanálů

V rámci procesu přenosu dat jsou na různých protokolových vrstvách různé typy dat, a proto byly vytvořeny 3 typy přenosových kanálů, viz obr. 1.9.

- Fyzické kanály – tyto kanály nesou uživatelské data a kontrolní zprávy přenosu, dělí se na downlink/uplink
- Transportní kanály – jsou kanály mezi fyzickou vrstvou a MAC vrstvou, pro přenos informace na přenos mezi nimi, dělí se na downlink/uplink
- Logické kanály – dodávají služby pro LTE (MAC) vrstvu, dělí se na provozní a kontrolní



Obrázek 1.9: Kanálová architektura

### 1.8.1 Fyzické kanály LTE

#### Downlink směr

- **PBCH** – *Physical Broadcast Channel* – přenáší systémovou informaci pro UE uvnitř buňky, který požaduje přístup do sítě
- **PHICH** – *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel* – hlášení o stavu HARQ
- **PMCH** – *Physical Multicast Channel* – přenáší systémové informace pro multicast
- **PDSCH** – *Physical Downlink Shared Channel* – přenáší unicast a stránkovací funkce, přenos transportních dat
- **PCFICH** – *Physical Control Format Indicator Channel* – přenáší informace pro UE, aby mohl dekódovat PDSCH
- **PDCCH** – *Physical Downlink Control Channel* – přenáší časovou informaci o plánování

#### Uplink směr

- **PUSCH** – *Physical Uplink Shared Channel* - přenáší unicast a stránkovací funkce
- **PUCCH** – *Physical Uplink Control Channel* – posílá HARQ potvrzení
- **PRACH** – *Physical Random Access Channel* – použití pro funkce náhodného přístupu [11]

### 1.8.2 Transportní kanály LTE

#### Downlink směr

- **DL-SCH** – *Downlink Shared Channel* – hlavní kanál Downlink přenosu, použití také logickými kanály
- **BCH** – *Broadcast Channel* – vázaný na kanál BCCH
- **MCH** – *Multicast Channel* – přenášení nastavení multicast přenosů do MCCH kanálu
- **PCH** – *Paging Channel* – přenáší PCCH kanál

#### Uplink směr

- **UL-SCH** – *Uplink Shared Channel* – hlavní kanál pro uplink směr [11]
- **RACH** – *Random Access Channel* – je používán pro požadavky s náhodným přístupem

### 1.8.3 Logické kanály LTE

#### *Kontrolní kanály*

- **BCCH** – *Broadcast Control Channel* – poskytuje systémové informace všem UE, které jsou připojené k síti
- **PCCH** – *Paging Control Channel* – stránkovací informace, využívá se, pokud se nezná poloha UE
- **CCCH** – *Common Control Channel* – informace k náhodnému přístupu, např. pro nastavení spojení
- **MCCH** – *Multicast Control Channel* – informace pro multicast příjem
- **DCCH** – *Dedicated Control Channel* – přenáší informace o uživateli, kontrola síly signálu, handover atd.

#### *Provozní kanály*

- **MTCH** – *Multicast Traffic Channel* – přenos multicast dat
- **DTCH** – *Dedicated Traffic Channel* – přenos uživatelských dat [11]

## 1.9 Měřené parametry ovlivňující kvalitu sítě

### 1.9.1 AMC

Adaptivní modulace a kódování (Adaptive Modulation and Coding) slouží k efektivnímu spojení eNB a UE. Hlavním parametrem tohoto přizpůsobení je Channel Quality Indicator (indikátor kvality kanálu). Typ modulace závisí na parametru CQI, který určuje kvalitu kanálu, viz tabulka 1.3.

eNodeB nabízí několik typů parametrů CQI a UE se dohodne na nejvyšším možném indexu, pro který kódovací systém (Modulation and Coding Scheme) nepřekročí BLER (Block Error Rate) transportní vrstvy 10 %. Výpočet hodnoty závisí na použitém modelu kanálu. Hodnoty, které převážně určují výpočet, jsou SNR, SINR a SNDR z hodnot měřeného přenosového kanálu. Jaký faktor bude upřednostněn a použit, záleží na daném modelu, který síťový operátor využije [8].

Výpočet hodnoty CQI probíhá v reálném čase a slouží pro jednodušší alokaci zdrojů mezi různými koncovými uživatelskými zařízeními, které požadují služby sítě. Hodnotu CQI vyčte AMC z uplink kontrolních informací PUCCH, který přenáší hodnotu CQI periodicky a kanál PUSCH aperiodicky, záleží na konkrétním nastavení sítě. V případě, že je silný signál s hodnotou SNR alespoň 20 dB a více, nastaví se hodnota CQI=15 a zvolí se modulace 64-QAM pro maximální propustnost sítě.

V případě, že kvalita přijímaného signálu poklesne, např. vlivem jiného zdroje rušení, nastane na tomto kanálu snížení propustnosti a systém může zvolit ze dvou postupů. Zachová stejnou modulaci a zvýší redundanci v signálu pomocí FEC (Forward Error Correction), který funguje jako dopředná oprava chyb. Jedná se o kontrolu chyb v přenosu dat a kóduje redundanci dat pomocí samoopravitelného kódu ECC, což příznivě ovlivňuje kvalitu přenášených dat. A druhou možností je snížit na hodnotu CQI=8 a tím se změni modulace, např. o řád menší 16-QAM [9].

Dohodnuté hodnoty musí být co nejpřesnější z důvodu dobré efektivity využití sítě. Složitější určování hodnoty je v případě, že koncová stanice často mění rychlost pohybu, a proto je co nejpřesnější zvolení typu modulace důležité. Hodnota CQI=1 je zvolena jako nejhorší modulace, kdy je použito typu modulace QPSK. Hodnota CQI=15 je nejlepší, kdy je použito 64-QAM pro maximální efektivní rychlost přenosu dat. Měření probíhá v intervalu 1 ms (TTI – Transmission Time Interval) po celou dobu připojení UE do sítě. Hodnota je zapsána ve 4 bitovém stavu. Pomocí CQI lze tedy příznivě či negativně ovlivňovat rychlost přenosu dat UE [10].

CQI index	Typ Modulace
0	„Není spojeno“
1	QPSK
2	QPSK
3	QPSK
4	QPSK
5	QPSK
6	QPSK
7	16-QAM
8	16-QAM
9	16-QAM
10	64-QAM
11	64-QAM
12	64-QAM
13	64-QAM
14	64-QAM
15	64-QAM

Tabulka 1.3: Modulační schémata a úrovně CQI

### 1.9.2 SNR

Signal-to-Noise ratio. Úroveň signálu vztažená k hladině šumu. Je to způsob, jak lze měřit úroveň šumu. SNR je měřítko k porovnání úrovně požadovaného signálu na úroveň šumu a je definován jako poměr výkonu mezi signálem a šumem. V rovnici 1.2 je P průměrná hodnota výkonu.

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{\text{šum}}} \quad (1.2)$$

SNR je vyjádřeno v decibelech (dB), je tedy definováno jako,

$$SNR_{dB} = 10 \times \log_{10} \left( \frac{P_{signal}}{P_{\text{šum}}} \right). \quad (1.3)$$

### 1.9.3 BLER

Block Error Rate určuje „přesnost“ získaných dat. BLER je způsob, jak ukázat a definovat „přesnost“ dat. Je to poměr mezi počtem chybných bloků a celkovým počtem přijatých bloků, vzorec 1.4. Čím nižší je hodnota BLER, tím lepší výkon sítě bude. Výkon je přijatelný, pokud se BLER drží pod určitou prahovou hodnotou, typicky chybovost menší než  $< 10\%$ . V případě, že hodnota BLER je příliš vysoká, bude mnoho chyb v přenášených datech, která jsme přenesli, a data pozbydou významnosti.

$$BLER = \frac{\text{Počet chybných bloků}}{\text{Počet přenesených bloků}} \quad (1.4)$$

### 1.9.4 Měření UE

#### 1.9.4.1 RSSI

Received Signal Strength Indicator měří celkový přijímaný výkon UE, tabulka 1.4. Pomáhá při určování interferencí a šumu. Zahrnuje výkon z obslužné buňky a také rušení mezi kanály, šumem a termálním hlukem atd. Měří průměrný celkový přijatý výkon pro OFDM symboly. Které obsahují referenční symboly pro anténní vstup 0 (OFDM symboly 0 a 4 ve slotu) v šířce pásma měření po dobu celkového počtu zdrojových bloků. RSSI hodnota je pouze hodnota, kterou měří UE a neposílá ji dále na eNodeB. Vzorec výpočtu 1.5, kde  $N$  je počet Resource Blocks.

$$RSSI = 12 \times N \times RSRP \quad (1.5)$$

Hlášená hodnota	Naměřená hodnota (dBm)
RSSI_00	$RSSI < -110$
RSSI_01	$-110 \leq RSSI < -109$
RSSI_02	$-109 \leq RSSI < -108$
...	...
RSSI_61	$-50 \leq RSSI < -49$
RSSI_62	$-49 \leq RSSI < -48$
RSSI_63	$-48 \leq RSRQ$

Tabulka 1.4: Rozsah hodnot RSSI

#### 1.9.4.2 RSRQ

Reference Signal Receive Quality označuje kvalitu přijímaného referenčního signálu. Měření a výpočet je založen na hodnotě RSRP a RSSI. Od hodnoty RSSI určuje kvalitu signálu a od RSRP určuje mezikanálové rušení a šum. Vzorec pro výpočet 1.6. Hodnota  $N$  představuje počet zdrojových bloků.

$$RSRQ = \frac{RSRP}{RSSI} \times N \quad (1.6)$$

Rozsah hodnot v tabulce 1.5, který je možný měřit pomocí RSRQ, je definován od -19,5 dB do -3 dB s přesností na 0,5 dB.

Hlášená hodnota	Naměřená hodnota (dB)
RSRQ_00	$\text{RSRQ} < -19,5$
RSRQ_01	$-19,5 \leq \text{RSRQ} < -19$
RSRQ_02	$-19 \leq \text{RSRQ} < -18,5$
...	...
RSRQ_32	$-4 \leq \text{RSRQ} < -3,5$
RSRQ_33	$-3,5 \leq \text{RSRQ} < -3$
RSRQ_34	$-3 \leq \text{RSRQ}$

Tabulka 1.5: *Rozsah hodnot RSRQ*

#### 1.9.4.3 RSRP

Reference Signal Receive Power je průměrný výkon Resource prvků (RE), které nesou buňkové specifické Referenční signály (RS) přes celou šířku pásma. Takže RSRP měří pouze v symbolech, které nesou RS. RSRP je průměrný přijatý výkon z jednoho prvku RS zdroje. UE měří výkon z více RE pro přenos referenčního signálu.

Rozsah měření, viz tabulka 1.6 je od hodnoty -44 do -140 dBm s přesností 1 dBm. Hodnoty, které jsou běžně dostupné, jsou od -65 dBm v blízkosti eNodeB a až -120 dBm na okraji pokrytí.

Hlášená hodnota	Naměřená hodnota (dBm)
RSRP_00	$\text{RSRP} < -140$
RSRP_01	$-140 \leq \text{RSRP} < -139$
RSRP_02	$-139 \leq \text{RSRP} < -138$
...	...
RSRP_95	$-46 \leq \text{RSRP} < -45$
RSRP_96	$-45 \leq \text{RSRP} < -44$
RSRP_97	$-44 \leq \text{RSRP}$

Tabulka 1.6: *Rozsah hodnot RSRP*

Příklad výpočtu RSRP: Šířka kanálu 20 MHz (Počet Resource Bloků 100, každý 12 subnosných), frekvenční pásmo 810-830 MHz, výstupní výkon eNode 10W, útlum eNodeB kabelové trasy je 5 dB, útlum prostředí 120 dB a zisk antény 15 dB. Výpočet provedeme na jednu subnosnou pomocí vzorce 1.7 [12].

$$L = 10 \log \left( \frac{\text{výstupní výkon eNodeB}}{\text{počet subnosných} * \text{počet RB}} \right) \quad (1.7)$$

$$L = 10 \log \left( \frac{10}{12 * 100} \right) \quad (1.8)$$



$$L = 9,2 \text{ dBm} \quad (1.8)$$

Od výsledné hodnoty odečteme útlum trasy, útlum prostředí a přičteme zisk antény.

$$RSRP = 9,2 - 5 - 120 + 15 \quad (1.9)$$

Výsledná hodnota RSRP je:

$$RSRP = -100,8 \text{ dBm} \quad (1.10)$$

### 1.9.5 Měření eNodeB

#### 1.9.5.1 *Downlink RS Tx Power*

Downlink Reference Signal (RS) Transit Power je určen pro měření vysílaného výkonu (W) referenčního signálu, který je přenášený přes eNodeB. Referenčním bodem pro měření výkonu je anténní konektor Tx. Měření musí být přesné a měření zahrnuje i ztráty.

#### 1.9.5.2 *TNP*

Termal Noise Power je měření tepelného šumu v uplink režimu pro více RB. Vzorec 1.11, kde  $N_0$  je výkon bílého šumu a  $W$  je šířka pásma přenosu.

$$TNP = N_0 \times W \quad (1.11)$$

#### 1.9.5.3 *RIP*

Received Interference Power je měření interference a termálního šumu v jednom RB, který není určen pro přenos uvnitř buňky. Měření slouží k identifikaci úzkopásmového rušení ze sousedních buněk na stejné frekvenci a porovnání těchto hodnot. Odchylka je možná v toleranci  $\pm 4$  dBm v měřicím rozsahu -117 až -96 dBm.

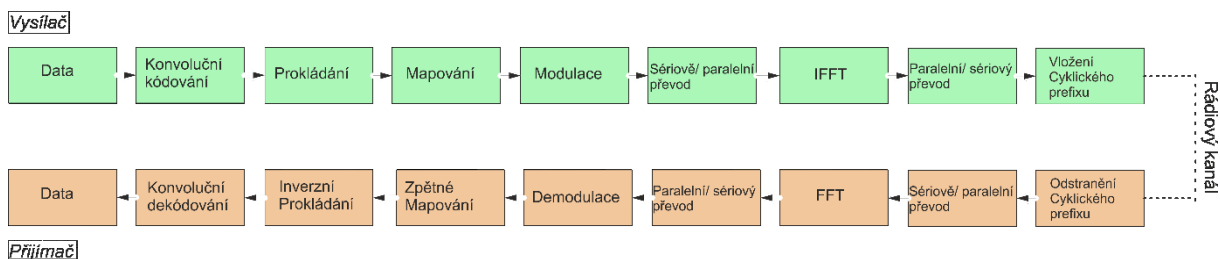
## 2 Návrh přenosového modelu

Simulační program vyvinutý pro simulování LTE technologie pro prostředí simulačního programu Matlab [13][14]. Vývoj zdrojových kódů vznikl a dále vylepšuje tým z Institutu telekomunikací z Technické univerzity TU Wien [16]. Jedním z dalších bodů zadáním diplomové práce je návrh přenosového modelu systému LTE a následné reprodukování výsledků. Porovnání s naměřenými reálnými sítěmi a porovnání správnosti výsledků simulace. Simulátor nabízí programové vybavení k jednotlivým částem přenosového modelu. Úkolem je zprovoznění a nastavení jednotlivých částí tak, aby síť mohla reprodukovat měřitelné výsledky.

Na obrázku 2.1 je zobrazen návrh přenosového modelu, který je také použit v simulaci. Návrh přenosového modelu vychází ze standardního doporučení LTE technologie a norem, používaných při standardně aktuálně používaných sítích v reálném provozu. Při simulaci downlink režimu je výstupem simulace graf, který zobrazuje maximální dosažitelnou rychlost v konfiguraci SISO, tedy simulované jednou anténou na eNodeB a jednou na klientském zařízení. Je sledována závislost na rychlosti sítě a parametru SNR a dále také chybovosti BLER v závislosti na parametru SNR. Simulace probíhaly s porovnáním všech CQI s hodnotami v rozmezí od 1 do 15 a SNR v rozmezí od -10 do 30 [dB].

Byly použity pro porovnání tři nejvíce využívané frekvence v České republice, tj. 800MHz, 1800MHz a 2100MHz při porovnávání rádiového kanálu typu AWGN a flat Rayleigh. To vše při několika typech šířkách kanálů 1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz a 20MHz pro maximální využití kapacity frekvenčního přidělu. Pro potřeby simulací byl použit notebook, vybavených hardwarem s procesorem Intel Core i3-3110M se 4 vlákny, 8GB paměti RAM a se softwarem Matlab R2014a.

Simulace vyžadovaly obrovský výpočetní výkon a mnoho paměti. Pro ovlivnění rychlosti simulace a kvality nasimulovaných výsledků se definuje počet přenášovaných subrámců. Pro měření bylo použito 100 přenesených subrámců. Pro rychlejší, ale méně přesné simulace, by byla nastavena hodnota 10, kdy se výpočty rapidně zrychlí. V tabulce 2.1 jsou zobrazeny časy simulace se srovnáním časů AWGN a flat Rayleigh kanálu při daných šířkách a frekvencích přenosových kanálů.



Obrázek 2.1: Návrh přenosového modelu LTE

## 2.1 Popis simulátoru

Hlavní spouštěcí soubor je *LTE\_sim\_main.m*, který definuje jednovláknovou nebo defaultně vícevláknovou simulaci. Konfigurační soubor, který definuje všechny proměnné simulace je *LTE\_load\_parameters.m*. Jedná se o soubor, který je ovládaný souborem *LTE\_simulation.m*, kde jsou definované hodnoty jako CQI, sub rámce, rozsah SNR. Tento soubor po spuštění primárně načte svoje vstupní proměnné a dále se dotazuje na další konfigurace již výše zmíněných souborů *LTE\_sim\_main.m*, přes který se simulace spustí. V případě spuštění souboru bez grafického rozhraní je nutné vymazat proměnné u definování frekvence a šířky kanálu. Je to z důvodu, že z tohoto souboru ovládá grafické rozhraní vstupní proměnné a bez spuštění grafického rozhraní nejsou tyto dvě hodnoty načteny.

Soubor *LTE\_load\_parameters.m* primárně definuje základní nastavení sítě podle specifikací a norem 3GPP a přidává další nutné nastavení simulátoru, jako např. počet Resources bloků podle zadané šířky pásma, počtu HARQ opakování, velikosti subnosné a další primární nastavení sítě. Tento kód se zpětně dotazuje na soubory *LTE\_load\_parameters\_depent.m*, který rozšiřuje a hlavně kontroluje nastavené hodnoty a jejich funkčnost. Také předává již dříve zadané parametry. Kontroluje, zda jsou jednotlivé hodnoty kompatibilní a zda je možno je použít. Definuje velikost rámců, typ kanálového přenosu, počet OFDM symbolů v jednom slotu, počet symbolů na rámec a další nezbytné hodnoty. *LTE\_load\_parameters\_generate\_elements.m* primárně generuje a inicializuje UE a eNodeB.

Další soubory obsažené v simulátoru jsou dotazovány a vypočítávány zpětně podle těchto výše základních konfiguračních souborů. Tyto konfigurační soubory načítají proměnné a definují konfiguraci ze základního konfiguračního souboru a pro výpočty načítají soubory, které jsou pojmenovány názvem, který definuje jejich primární účel. Jméno všech souborů simulátoru začíná názvem LTE. Je to z důvodu propojenosti a přehlednosti konfiguračních souborů. Proto jsou hlavní konfigurační soubory pojmenovány podle této souborové hierarchie. Totéž platí i pro vytvořené grafické rozhraní *LTE\_GUI\_simulator.fig* a *LTE\_GUI\_simulator.m*. V případě, že je vytvořený nový primárně spouštěcí soubor bez názvu LTE na začátku souboru, nemusí simulátor tyto soubory akceptovat a může je ignorovat. Proto jsou hlavní konfigurační soubory pojmenovány podle tohoto pravidla.

### 2.1.1 Blok data

Jedná se o programový blok, ve kterém je implementován generátor náhodných dat. Tento blok generuje sériový binární tok, ve kterém jsou nuly a jedničky rovnoměrně rozloženy. Velikost generovaných dat závisí na počtu zadaných přenesených subrámců v simulaci.

### 2.1.2 Blok konvoluční kódování

Tento blok se využívá pro funkci kanálového kódování, který má za úkol zabezpečovat přenášený datový tok a to především proti chybám v rádiové části. Zabezpečení provádí tak, že zvyšuje redundanci. To má za následek zmenšení chybovosti BLER a mírné zvýšení rychlostí.  $K(n,k,m)$  je standardní označení kodéru,  $n$  je počet výstupních bitů,  $k$  je počet vstupních bitů a  $m$  je počet pamětí registrů v kodéru.

### 2.1.3 Blok prokládání

Má primárně za úkol zabezpečovat pomocí prokládání přenášených dat ochranu proti shlukovým chybám. Pomocí rozprostření chyby na bity se data lépe upravují a pomocí hloubkového prokládání určuje, jak velká přípustná skupinová chyba může nastat.

### 2.1.4 Blok mapování

Má za úkol sériový datový tok mapovat do symbolů. V závislosti na použité modulaci systému LTE jsou sériové datové toky mapovány do symbolů podle použité modulace (QPSK, 16-QAM, 64-QAM)

### 2.1.5 Blok modulace

V tomto bloku jsou data modulována pomocí tří typů použité modulace. Typ použité modulace určuje hodnota přijímaného signálu a pomocí CQI se odvozuje typ modulace, viz kapitola 1.9.1. QPSK modulace přenáší informace ve změně fáze, je to čtyřstavová modulace, jeden symbol přenáší dva bity. QAM modulace přenáší informace ve změně amplitudy nosné vlny. Používá se buď 16, nebo 64 stavová modulace a každý symbol je vyjádřen 4 nebo 6 bity.

### 2.1.6 Blok sériově/paralelní převod

Tento blok převádí sériový datový tok na paralelní datový tok. Počet toků odpovídá hodnotě počtu subnosných vln modulace OFDM. Kolik je použitých subnosných vln, je závislé na použité šířce pásma a pro každou šířku pásma je definován počet RB.

### 2.1.7 Blok IFFT

Symboly jsou převedeny v jednotlivých nosných z frekvenční oblasti do časové oblasti, kterou určuje algoritmus IFFT.

### 2.1.8 Blok paralelně/sériový převod

Tento blok má opačnou funkci jako blok 2.1.6. Tedy je paralelní signál sloučen do jednoho sériového toku a tento signál odpovídá OFDM signálu v čase.

### 2.1.9 Blok vložení cyklického prefixu

Cyklický prefix je vkládán jako ochranný interval mezi jednotlivé OFDM symboly. Před symbol se vloží část z jeho konce a omezuje vznik Intersymbol Interference (ISI). Nepřenáší žádné užitečné informace. Na přijímací straně je tato část dat odstraněna.

## 2.2 Grafické rozhraní

Grafické rozhraní bylo vytvořeno v důsledku ulehčení zadávání vstupních parametrů simulace, které se nyní nemusí zadávat přímo do kódu, ale zadávají se v grafickém rozhraní. Soubor s názvem *LTE\_GUI\_simulator.m* je konfigurační kód, který ovládá grafické rozhraní. Soubor *LTE\_GUI\_simulator.fig* spouští grafické rozhraní. Jak lze vidět na obrázku 2.2, zadávání hodnot je intuitivní a lze měnit 5 hodnot simulace.

Definování vstupních hodnot je nutné zadávat v pořadí zleva doprava. Tedy nejprve je nutné zadat Frekvenci [MHz], kde lze vybrat ze 4 možných variant. Dále je na výběr Šířka kanálu [MHz], kde je celkem 6 variant. Poté je nutné vybrat hodnotu CQI, kde je na výběr 15 možných variant. Typ kanálu je na výběr ze dvou variant a počet subnámožků určuje rychlost a přesnost simulace.

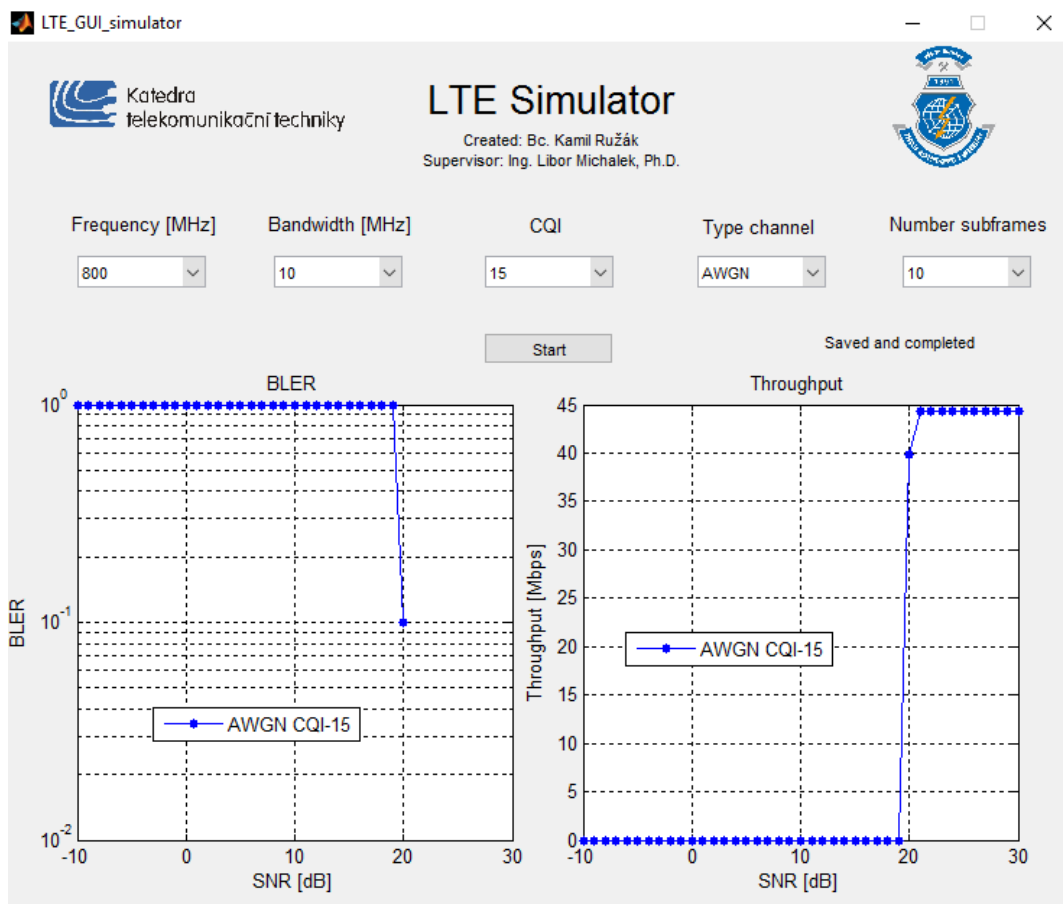
Pro nejrychlejší simulaci je nutné zadat variantu 10, která přenese 10 subnámožků. Pro přesnější měření lze zvolit z variant 50, 100 a 1000. Poslední hodnota je nejpřesnější, ale taky časově nejvíce náročná. Podle předešlých hodnot, především šířky kanálu a CQI je simulace časově náročná od desítek minut až po jednotky hodin. Záleží na použitém hardwarovém vybavení daného počítače.

Všechny hodnoty je nutné zvolit, i když jsou základní hodnoty předvoleny. Je nutné všechny hodnoty rozkliknout a určit hodnotu. V případě, že se tak nestane, simulace se nespustí. Poté po určení hodnot je nutné kliknout na tlačítko *start*, které spustí simulaci. Po výpočtu se vykreslí dva grafy. První graf zobrazuje hodnoty chybovosti BLER (osa X zobrazuje hodnotu SNR, osa Y BLER) a druhý graf Propustnost (osa X zobrazuje SNR, osa Y Propustnost).

Před vykreslením grafů se výsledek simulace zapíše do složky */vysledky*, kde se uloží soubor s generovaným názvem podle zadaných hodnot a příponou \*.mat. V případě opakované simulace je nutné vždy okno zavřít a grafický simulátor spustit znovu. Je to v důsledku implementace vykreslení grafů, který vykresluje hodnoty z Matlab kontejneru, který se vytvoří ještě před vykreslením grafů.

V implementaci grafického kódu je použit upravený konfigurační kód *LTE.simulation.m*, který je upravený z důvodu jiného spouštění grafického rozhraní. Tento soubor spouští další soubory a to *LTE\_load\_parameters.m*, který načítá další konfigurační soubory potřebných pro simulaci. Další primární soubor, který je spuštěn je *LTE\_sim\_main*. Jedná se o hlavní spouštěcí kód simulace, který primárně definuje, přepínání mezi jednovláknovou simulací a vícevláknovou simulací.

V případě, že se grafické rozhraní spustí na HW konfiguraci s jedním jednojádrovým procesorem, simulace se nespustí. Je to z důvodu, že všechny konfigurace jsou předem definované pro více jádrové procesory a v případě spuštění více instancí na jednom vláknu, simulace neproběhne. Je to také z důvodu programu *Matlab\_parpool*, který spouští paralelní výpočty na více jádrech. Defaultně je nastaveno spuštění na čtyřech jádrech. V případě spuštění na více jádrových procesorech, je nutné zvýšení pomocí nastavení *Matlab\_parpool*. Ve správně konfigurovaném Matlabu, by se počet jader měl zvýšit automaticky. Před spuštěním je nutné upravit Matlab soubor *apiDeprecationMessage.m* zakomentováním chybového hlášení na řádce číslo 10.



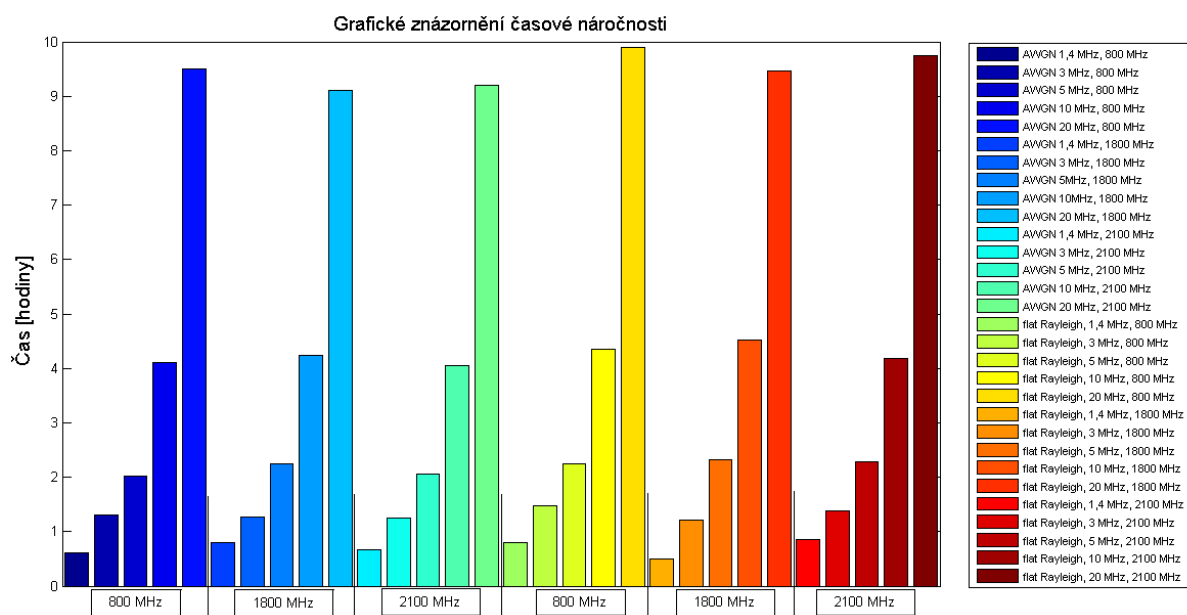
Obrázek 2.2: Grafické rozhraní simulátoru

### 2.3 Časová náročnost simulací

V tabulce 2.1 je zobrazen čas simulací v závislosti na daných typech frekvencí, šířkách pásma a přenosových kanálech. Na obrázku 2.3 jsou časy zobrazeny v grafu.

Časová náročnost simulací							
CQI [1:15], SNR [-10:30], 4 vlákna							
Frekvence		800MHz		1800MHz		2100MHz	
Přenosový kanál		AWGN	flat	AWGN	flat	AWGN	flat
Šířka kanálu	20MHz	9h30m	9h54m	9h10m	9h28m	9h20m	9h45m
	10MHz	4h06m	4h21m	4h14m	4h32m	4h04m	4h11m
	5MHz	2h01m	2h15m	2h15m	2h20m	2h03m	2h17m
	3MHz	1h18m	1h29m	1h16m	1h13m	1h15m	1h23m
	1,4MHz	0h37m	0h48m	0h25m	0h30m	0h40m	0h52m

Tabulka 2.1: Časová náročnost simulací



Obrázek 2.3: Časová náročnost simulací

### 3 Výsledky simulací

Simulace probíhaly s různými nastaveními a pro různé kroky simulace. Všechny simulace jsou v přenosovém nastavení SISO. Jedna přijímací a jedna vysílací anténa. Všechny simulace probíhají přes jednu eNodeB a jeden UE. Simulovaný terminál má vždy maximální možný potenciál přenosové kapacity k dispozici bez dalších připojených účastníků, což v reálném provozu nastane pouze v lokalitách s malým vytížením sítě. Simulovaly se rádiové přenosové kanály „AWGN“ a „flat Rayleigh“. Pro rychlost simulace a zároveň pro přesnost simulovaných výsledků, je počet přenesených subrámců nastaven na hodnotu 100. Simulované a porovnávané hodnoty jsou popsány v kapitole 2.0.

Pro velké množství dat, je vykreslena pouze nejvíce používaná frekvence v České republice, tj. 800 MHz a šířky kanálů 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz a 20 MHz. Jsou porovnány dva přenosové kanály pro CQI=8 a CQI=15. Všechny další simulované hodnoty pro ostatní frekvence 1800 MHz a 2100 MHz a ostatní šířky kanálů, jsou přiloženy v přílohách A až DD. V elektronické podobě jsou výsledky uloženy v souborech \*.mat ve složce *LTE\_Link\_Level/vysledky*.

#### 3.1 Frekvence 800 MHz, šířka kanálu 3 MHz

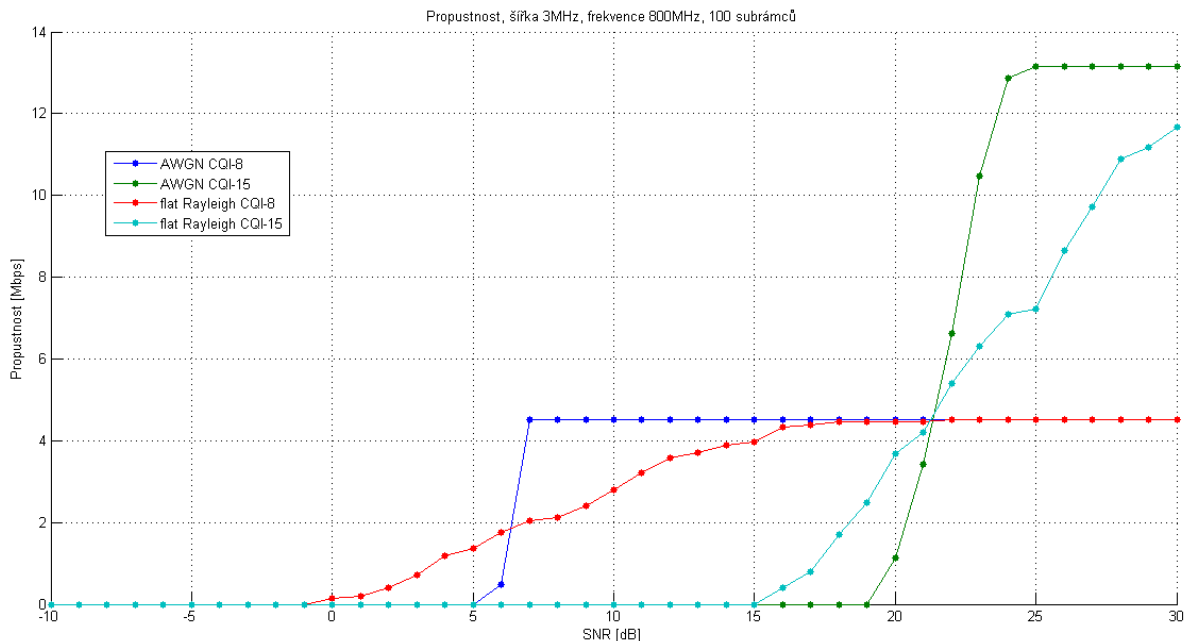
První simulace zahrnuje nastavení šířky kanálu na nejméně používanou šířku kanálu 3 MHz při frekvenci 800 MHz. Menší šířka kanálu 1,4 MHz se v praxi téměř nepoužívá z důvodu malé propustnosti. Výsledky simulace pro šířku kanálu 1,4 MHz jsou v příloze A. Je zde porovnáván kanál AWGN při nastavené hodnotě CQI=8 a kanál flat Rayleigh se stejnou hodnotou CQI=8. Z obr. 3.1 lze vidět, že při hodnotě CQI=8 je maximální hranice propustnosti na hodnotě 4,5 Mbps u obou kanálů, maximální rychlost je limitována hodnotou CQI a použitou modulací. Rozdíl v kanálech je v tomto případě pouze v tom, od jaké hodnoty SNR (dB) má schopnost přenosový kanál přenášet data. Je zde použita modulace závislá na hodnotě CQI=8 a to 16-QAM.

Kanál typu flat Rayleigh přenáší už od velmi nízké hranice -1 dB, ovšem s téměř nepoužitelnou hodnotou propustnosti, menší než 0,5 Mbps. Použitelná hodnota přenosové rychlosti, tj. 1,5 Mbps nastává až od hodnoty SNR=5 dB, ve které druhý porovnávaný AWGN kanál zahájí komunikaci a v hodnotě SNR=7 dB strmě stoupá až na maximální přenosovou rychlost odvozenou od hodnoty CQI=8. Flat Rayleigh dosahuje nejvyšší možné rychlosti až při hodnotě SNR=17 dB.

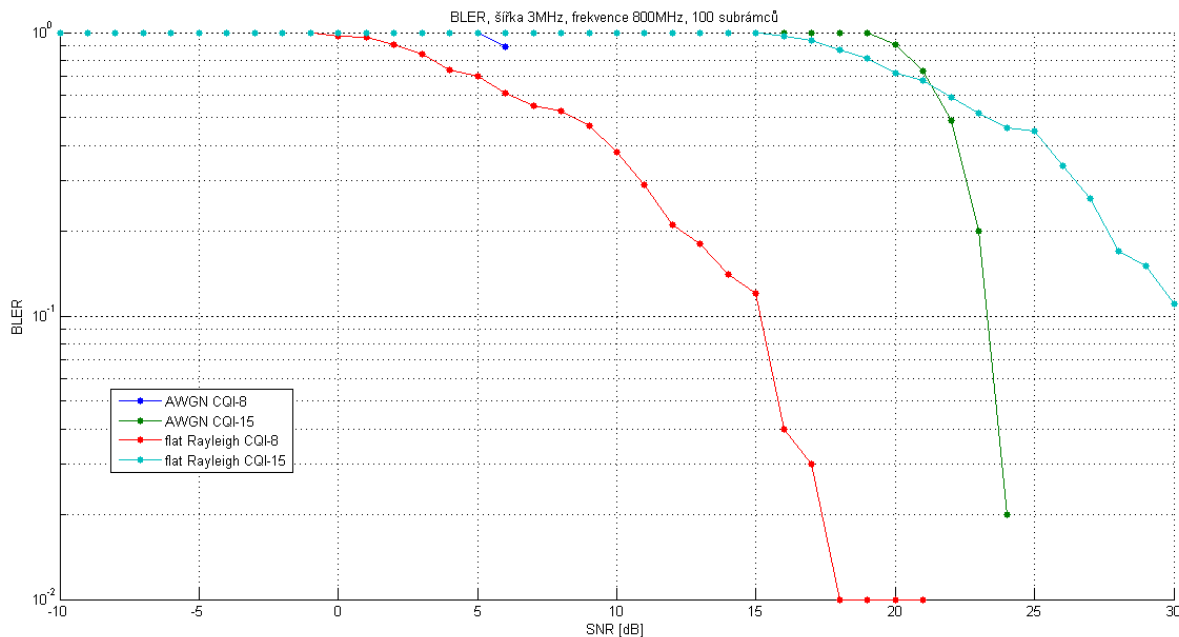
Z toho jasně vyplývá, že AWGN dosahuje teoretické rychlosti téměř okamžitě, kvůli přímé cestě signálů bez odrazů a přidání šum neovlivní rychlý nástup maximální rychlosti. Flat Rayleigh má nástup rychlosti pozvolný. U hodnot CQI=15 je maximální rychlost u AWGN kanálu 13 Mbps dostupných od hodnoty SNR=25 dB, rychlost zůstává stejná až do hodnoty SNR=30 dB a použitá je modulace 64-QAM.

Použitelná rychlost začíná od hodnoty SNR=20 dB, která je cca. 1 Mbps. Flat Rayleigh je standardně použitelnější od menších SNR, konkrétně od hodnoty SNR=15 dB a jeho maximální přenosová rychlost nastane těsně před hranicí SNR=30 dB a dosáhne rychlosti téměř 12 Mbps. Z obr. 3.1 lze vidět, že flat Rayleigh kanál je použitelnější v běžném datovém provozu, protože začíná přenášet data od menší hodnoty SNR, což se hodí ve více zarušeném prostředí. V případě většího CQI=15 je jasně lepší AWGN kanál, který dosahuje plné rychlosti šířky kanálu 5 MHz. Osa X se vždy vykresluje podle dosažených rychlostí a osa Y dosahuje vždy pevně definovaného rozpětí SNR od -10 dB do 30 dB, kde tyto hodnoty jsou definovány pomocí 3GPP.



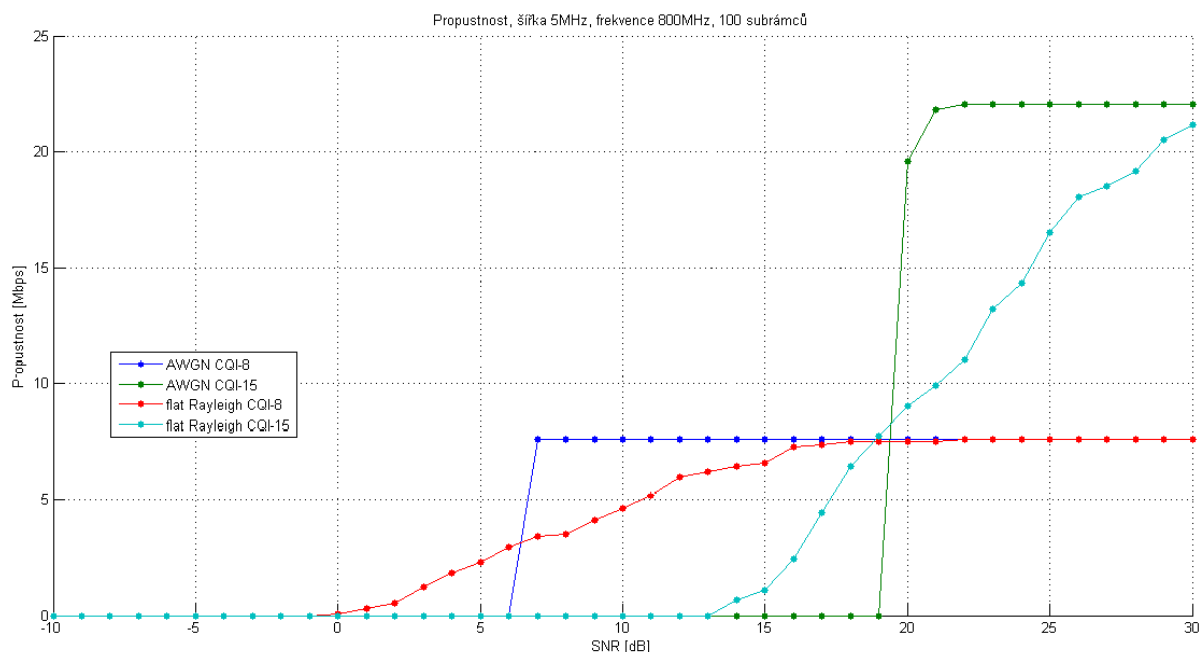
Obrázek 3.1: *Propustnost, šířka 3MHz, frekvence 800MHz*

Na obr. 3.2 lze vidět poměr chybovosti BLER k SNR. Při této konfiguraci simulace je patrné, že největší chybovost nastává u kanálu flat Rayleigh, od hodnoty SNR=-2 dB chybovost stoupá postupně až na hodnotu BLER  $10^{-2}$  a od hodnoty SNR=17 dB zůstává chybovost stejná. Z chybovosti tohoto kanálu je patrné, že vyšší hodnota chybovosti může za strmější dosahování maximální hodnoty. Na rozdíl od AWGN kanálu, který při stejné hodnotě CQI=8 dosáhl malé chybovosti a proto dosáhl plné rychlosti kanálu téměř okamžitě. Při CQI=15 je situace u AWGN kanálu jiná. Kanál dosahuje větších hodnot chybovosti než kanál flat Rayleigh při stejné hodnotě CQI. U tohoto kanálu je chybovost téměř o řád menší, ale z důvodu pomalejšího dosahování plné rychlosti je i přes vyšší chybovost AWGN kanál rychlejší.

Obrázek 3.2: *Chybovost, šířka 3 MHz, frekvence 800 MHz*

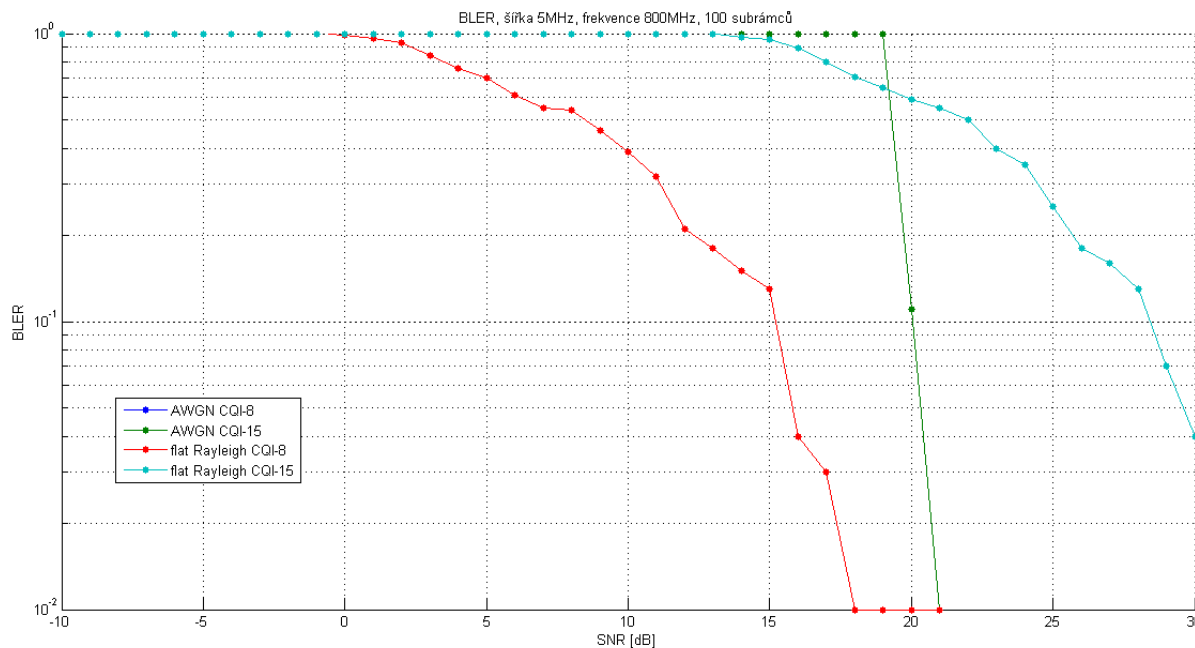
### 3.2 Frekvence 800 MHz, šířka kanálu 5 MHz

Druhá nejmenší šířka kanálu na obr. 3.3, která se používá v menších městech nebo tam, kde jsou rychlosti dostačující pro malou skupinu připojených UE. Maximální rychlost 22 Mbps u AWGN kanálu je dosažena při nejvyšší dostupné hodnotě CQI=15 a využívá modulaci 64-QAM. Rychlost je dostupná od hodnoty SNR=21 dB a od hodnoty SNR=19 dB se rychlost zvyšuje až do maximální možné hodnoty, která je 22 Mbps. Pro více zarušené prostředí je lepší přenosový kanál flat Rayleigh, který začíná přenášet data už od SNR=13 dB a už při hodnotě SNR=17 dB je použitelná přenosová rychlost 4 Mbps. Maximum přenosové rychlosti, kterou lze z flat Rayleigh kanálu odsimulovat je 21 Mbps, kterou dosáhne v hodnotě SNR=30 dB.



Obrázek 3.3: Propustnost, šířka 5 MHz, frekvence 800 MHz

Na obr. 3.4 chybovosti je vidět, že hodnota chybovosti BLER  $10^{-2}$  je u obou přenosových rádiových kanálů. Rozdíl je v tom, že tuto chybovost dosahuje přenosový kanál flat Rayleigh už při hodnotě CQI=8 s horší modulací (16-QAM) a kanál AWGN až při hodnotě CQI=15 (64-QAM). Je tedy patrné, že při lepší modulaci a vyšší hodnotě propustnosti je v přenosovém kanálu AWGN větší chybovost, ale zároveň to negativně neovlivňuje rychlost přenosu.

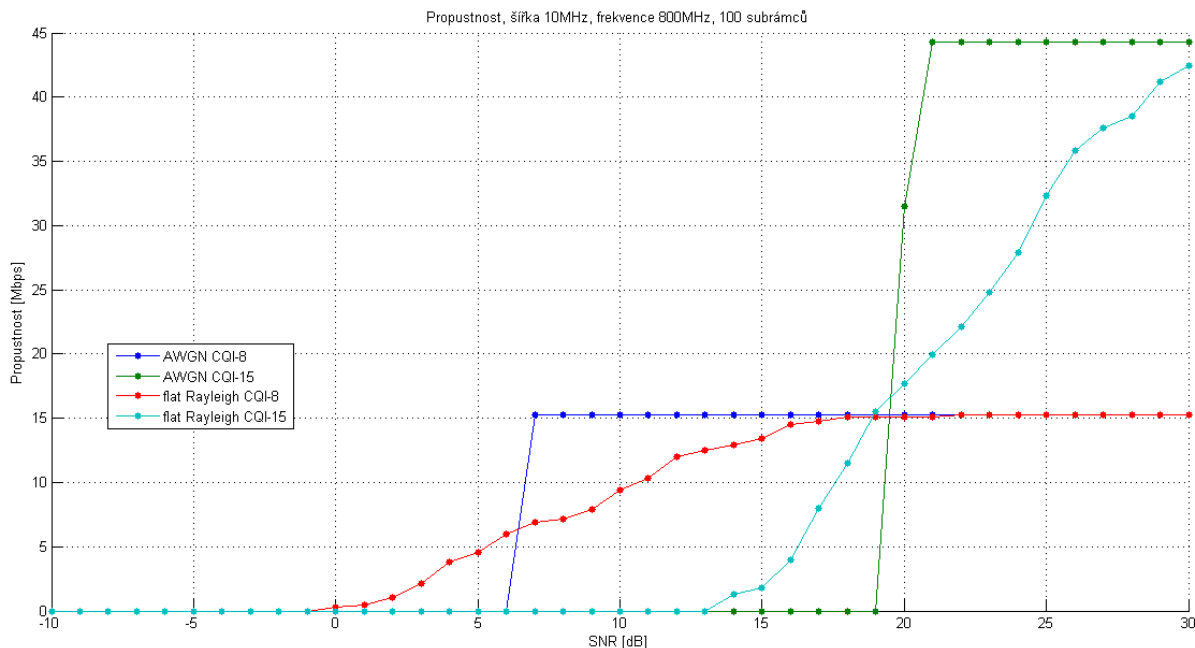


Obrázek 3.4: Chybovost, šířka 5 MHz, frekvence 800 MHz

### 3.3 Frekvence 800 MHz, šířka kanálu 10 MHz

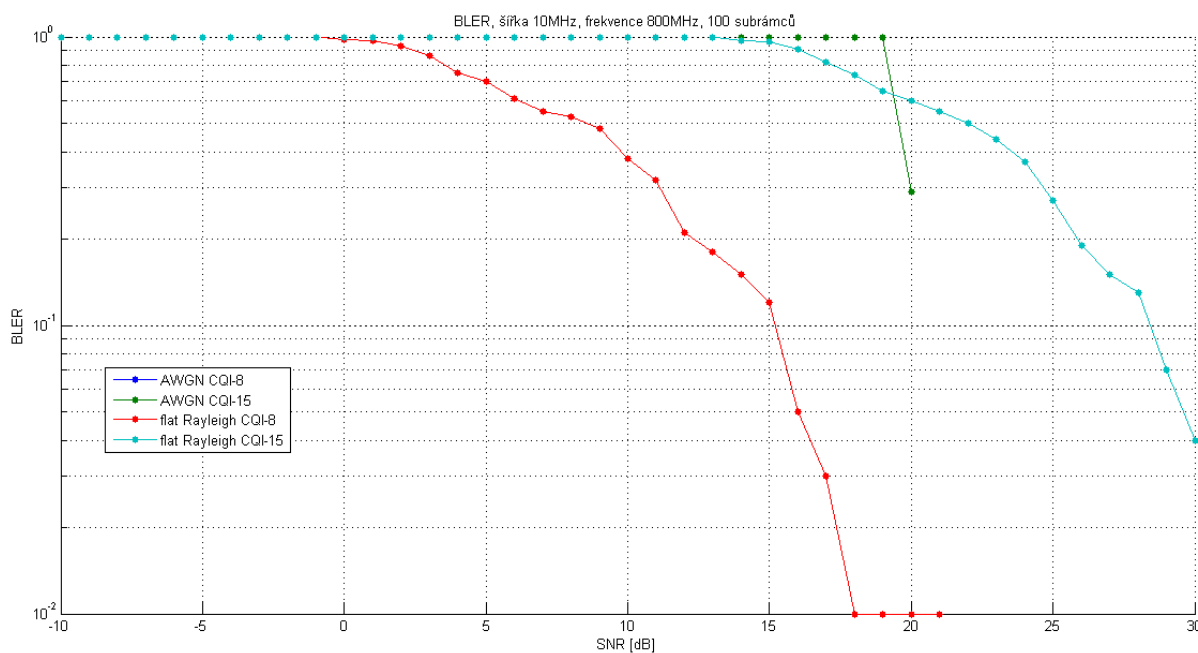
Další výsledky simulací obsahují šířku kanálu 10 MHz při stále stejné frekvenci 800 MHz. Tato šířka kanálu je nejvíce využívaná šířka kanálu při této frekvenci u všech tří operátorů v ČR. Jak lze vidět z obr. 3.5, při hodnotě CQI=8 začne přenosový kanál AWGN v hodnotě SNR=6 dB přenášet data a od hodnoty SNR=7 dB dosáhne maximální možné rychlosti při této konfiguraci, tj. 15 Mbps. Flat Rayleigh začne přenášet data od hodnoty SNR=0 dB. Stoupá kontinuálně až do hodnoty SNR=18 dB a odtud je dosažena maximální rychlost při CQI=8 a to 15 Mbps.

Při CQI=15 u AWGN kanálu lze vidět od hodnoty SNR=19 dB rapidní růst rychlosti a od hodnoty SNR=21 dB je dosaženo maximální rychlosti 44 Mbps. U flat Rayleigh je situace podle stejných pravidel a předpokladů tohoto typu kanálu. Začne sice data přenášet už od hodnoty SNR=13 dB, ale až do SNR=30 dB pomalu stoupá. Dosáhne maximální rychlosti v hodnotě 43 Mbps. Přenosový kanál flat Rayleigh nedosáhne rychlosti srovnatelné s přenosovým kanálem AWGN. Hodnota SNR je podle specifikací a norem měřena pouze do hodnoty SNR=30 dB. Přenosová rychlost dosažená v hodnotě SNR=30 dB je tedy maximální. Hodnota SNR=30dB je maximální hodnotou určenou podle 3GPP a rychlosti dosažené v této hodnotě jsou finální a propustnost se nemůže už dále zvyšovat.



Obrázek 3.5: Propustnost, šířka 10 MHz, frekvence 800 MHz

Z obr. 3.6 si nejprve všimneme toho, že chybovost u flat Rayleigh kanálu je stejná nebo téměř podobná, jako u chybovosti, obr. 3.4. Je to způsobeno tím, že tento přenosový kanál a jeho parametry jsou ovlivněny hodnotou CQI. Největší změnou simulovaných výsledků chybovosti disponuje přenosový kanál AWGN. Chybovost hodnoty CQI=8 je u toho přenosového kanálu tak malá, že není zakreslena. V případě chybovosti přenosového kanálu AWGN v hodnotě CQI=15 je hodnota chybovosti zanedbatelná a neovlivňuje výsledky simulace propustnosti.

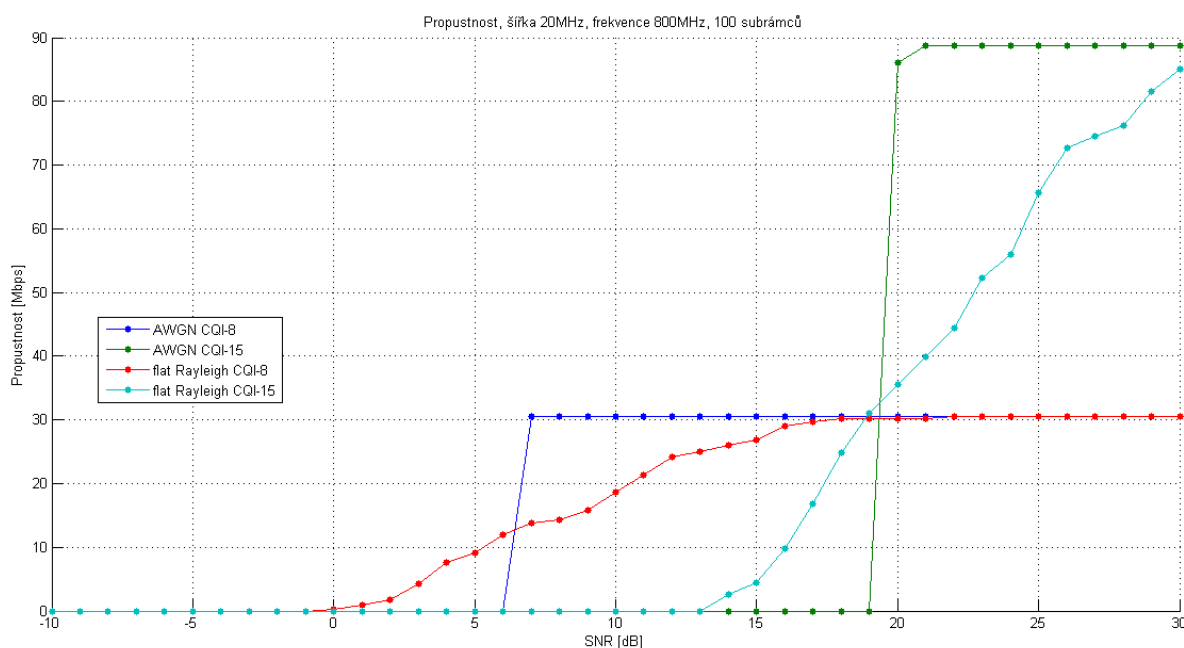


Obrázek 3.6: Chybovost, šířka 10 MHz, frekvence 800 MHz

### 3.4 Frekvence 800 MHz, šířka kanálu 20 MHz

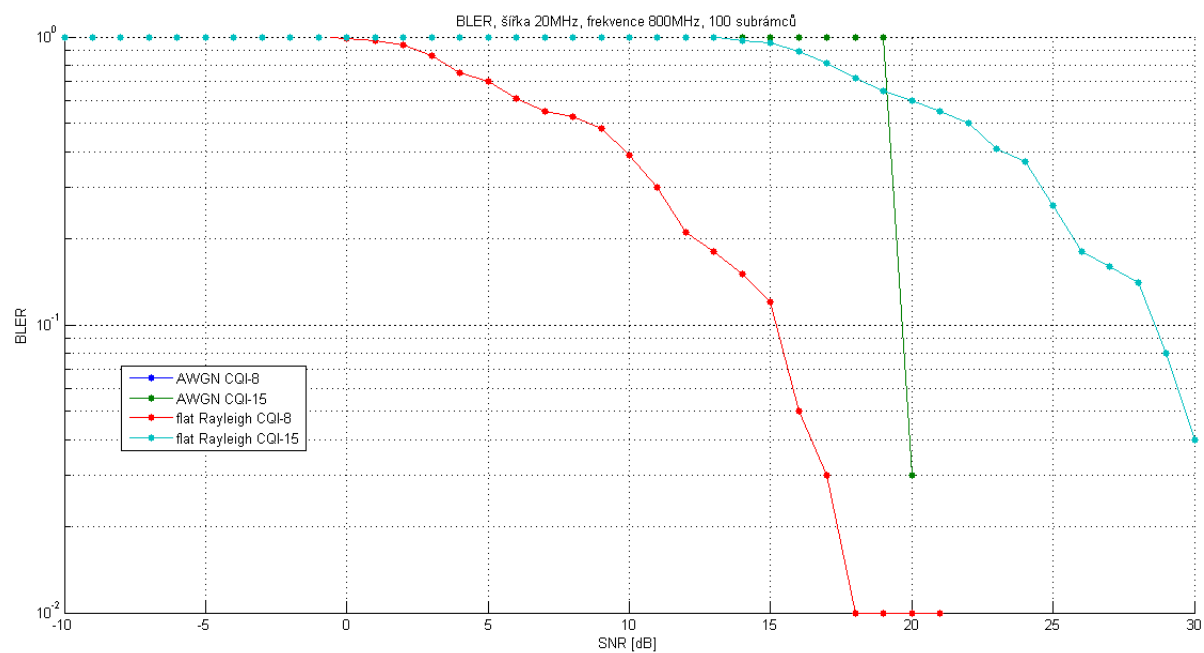
Největší možná šířka kanálu je podle specifikace 20 MHz, obr. 3.7. Při této šířce kanálu a hodnotě CQI=15 se projeví největší výhoda LTE technologie. Rychlosti stoupající téměř k 90 Mbps na přenosovém rádiovém kanálu AWGN, jasně dokazují kapacity této technologie. Od hodnoty SNR=19 dB rapidně narůstá rychlost a už při hodnotě SNR=21 dB dosahuje maximálního potenciálu sítě, tj. 90 Mbps, kde je využita nejlepší možná modulace 64-QAM.

U flat Rayleigh dosahuje už při hodnotě SNR=16 dB použitelnou rychlost 10 Mbps a stoupá až do hodnoty SNR=30 dB, kde dosahuje rychlosti 86 Mbps. Je zde využita modulace 64-QAM. U přenosového kanálu AWGN, při hodnotě CQI=8 začíná přenášet data od hodnoty SNR=6 dB. Od hodnoty SNR=7 dB dosáhne plné rychlosti 30 Mbps. Tato dosažená rychlost je ovlivněna hodnotou CQI=8 a dále je rychlost konstantní a nemění se. U přenosového kanálu flat Rayleigh začne přenášet data už od hodnoty SNR=-1 dB a postupně stoupá do hodnoty SNR=18 dB, kde dosáhne maximální přenosové rychlosti 30 Mbps. Použitelná rychlost 10 Mbps začíná už v hodnotě SNR=5 dB.



Obrázek 3.7: Propustnost, šířka 20 MHz, frekvence 800 MHz

V posledním obrázku 3.8 vidíme téměř stejnou chybovost u obou přenosových kanálů. Je to tedy ovlivněno především hodnotou CQI a šířka kanálu neovlivňuje chybovost. U AWGN kanálu při CQI=15 se zvýšila chybovost oproti chybovosti na šířce kanálu 10 MHz. Chybovost flat Rayleigh kanálu zůstala neměnná.



Obrázek 3.8: Chybovost, šířka 20 MHz, frekvence 800 MHz

## 4 TEMS Software

Pro ověření správnosti simulací, jsou pro srovnání změřeny hodnoty na reálné LTE síti. Pomocí TEMS™ Pocket Software od společnosti Ascom implementovaný v telefonu Sony Xperia V (LT25i) s operačním systémem Android 4.0.4. Pro ověření výsledků byla vybrána 800 MHz síť (3GPP Band number 20), která má největší zastoupení v České republice. Další frekvence např. 1800 MHz se vyskytuje pouze na málo lokalitách. Frekvence 2100 MHz a 2600 MHz není zatím běžně dostupná a slouží jen pro testování a odladění pro budoucí nasazení těchto frekvencí operátory.

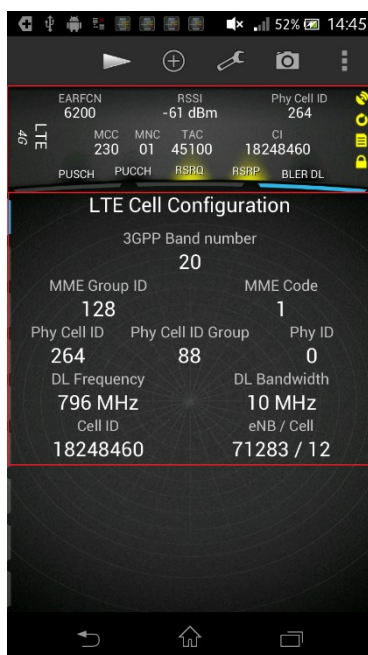
Testovaná frekvence 800 MHz má šířku kanálu 10 MHz a je použitý operátor T-Mobile. Oba zbývající operátoři mají také přiřazenou stejnou šířku kanálu 10 MHz. Výsledky všech tří operátorů by byly velmi podobné, proto je měření parametrů sítě realizováno u jednoho operátora, který má největší pokrytí touto frekvencí.

Pro měření a porovnání naměřených výsledků byl vybrán eNodeB na budově A, koleje VŠB-TUO s Cell ID 18248461, obr. 4.2. Pro porovnání hodnot, které jsou vykresleny v kapitole 3, bylo nutné odměřit výsledky primárně pro hodnoty CQI=8 a CQI=15. Hodnotu CQI=8 nebylo problém měřit v místech, kde byl horší signál, a hodnota byla odměřena v budově. Problém byl s hodnotou CQI=15, kterou nebylo možné téměř nikdy dosáhnout z důvodu velkého množství připojených uživatelů, velkého datového provozu přes tuto eNodeB a také velkých interferencí. Proto hodnota CQI=15 byla měřena v noci, kdy menší datový provoz a větší alokace datových prostředků způsobila to, že se podařilo hodnotu CQI=15 odměřit. Domněnka tedy byla potvrzena. Na stejném fyzickém měřicím místě a se stejným kvalitním signálem nebylo možné tuto hodnotu přes den dosáhnout. V noci na tomto stejném místě už ano. Pro srovnání hodnot bylo měřeno ze dvou míst, ale hodnoty z těchto dvou míst byly téměř identické. Vzdálenost prvního měření bylo 338 metrů a druhého 282 metrů. Lokality měření jsou vyznačeny na obr. 4.1.



Obrázek 4.1: *Lokalita měření*

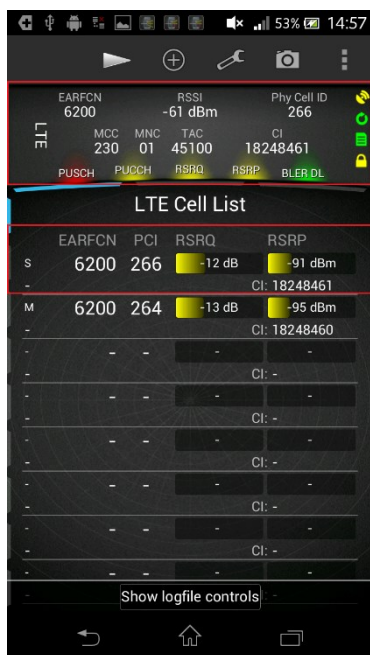
Vytvořený skript v programu TEMS SW byl nakonfigurován pro stahování 38 MB souboru z FTP serveru z adresy [ftp://ftp.upc.cz/pub/testrychlosti/fiber10\\_30s.bin](ftp://ftp.upc.cz/pub/testrychlosti/fiber10_30s.bin) a dále také zafixován na frekvenční pásmo 800 MHz.



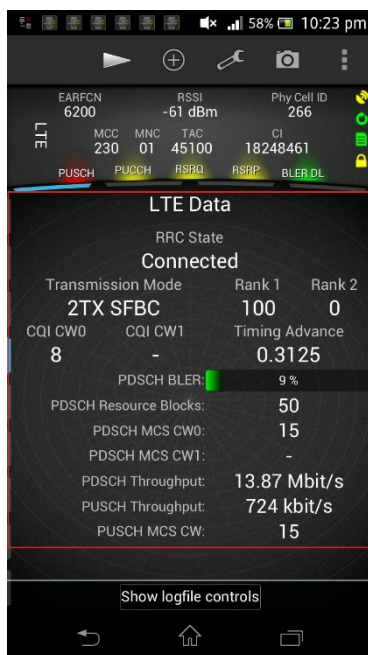
Obrázek 4.2: Parametry eNodeB

#### 4.1 Měření při CQI 8

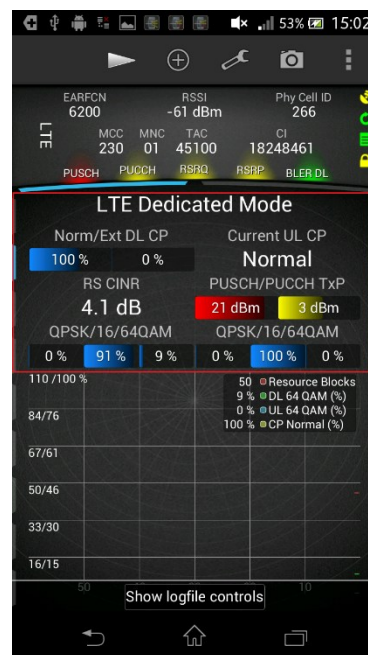
Na obr. 4.3, lze vidět hodnoty kvality přijímaného signálu připojeného mobilního telefonu na eNodeB s Cell ID 18248461.



Obrázek 4.3: Kvalita signálu



Obrázek 4.4: Propustnost CQI 8



Obrázek 4.5: Použitá modulace



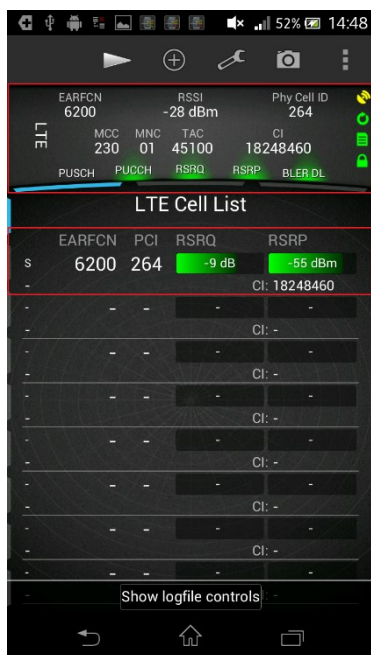
Hodnota RSSI -61 dBm je běžně naměřitelná hodnota ve více zarušených podmínkách. RSRQ a RSRP je dostatečná kvalita kanálu, více informací o těchto hodnotách je v kapitole 1.9. Na obr. 4.4 je zobrazena hodnota CQI=8, kterou bylo potřeba změřit pro srovnání nasimulovaných hodnot.

Měření probíhalo v budově. Jak lze vidět na chybovosti kanálu BLER 9 %, toto CQI bylo téměř na limitu chybovosti. To znamená, že pokud by chybovost byla větší než 10 %, CQI by bylo pozměněno na hodnotu 7. V případě poklesu hodnoty BLER o více než několik %, hodnota CQI by byla automaticky přepočítána na hodnotu 9. V obr. 4.4 je vidět maximální přenosová rychlost v downlink režimu do telefonu, tj. 13,87 Mbps. Na obr. 4.5 je zobrazena hodnota CINR 4.1 dB a dále lze vidět zaznamenanou použitou modulaci 16-QAM, která pro hodnotu CQI=8 plně odpovídá specifikacím.

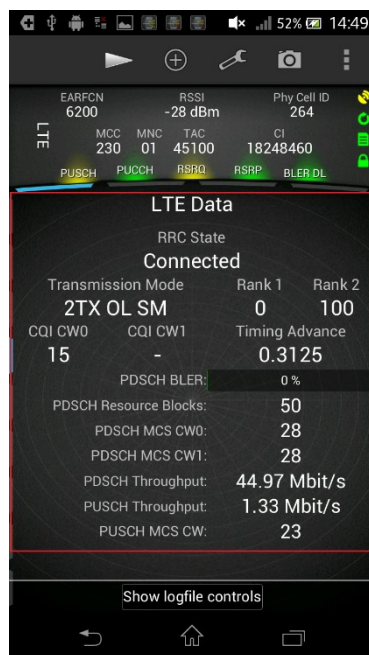
## 4.2 Měření při CQI 15

Na obr. 4.6 je zobrazena vynikající hodnota RSSI -28 dBm, která se podařila změřit při přímém výhledu na eNodeB v nočních hodinách. Vytíženost sítě byla minimální a podle porovnání hodnot měřených přes den, je hodnota přijímaného signálu lepší. Dále hodnoty RSRQ a RSRP jsou naprosto výborné a předurčují dobré výsledky propustnosti.

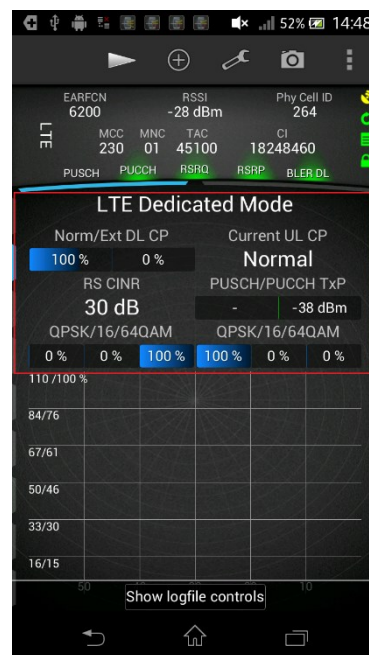
Na obr. 4.7 je vidět nejvyšší možná hodnota CQI=15 a s neměřitelnou nebo velmi malou chybovostí kanálu PDSCH s hodnotou BLER 0 %. Hodnota Resource Blocks značí využití maximálního počtu dostupných RB (50) pro kanál 10 MHz. Maximální přenosová rychlost se zastavila na hodnotě 44,97 Mbps. Z obr. 4.8 je vidět hodnota CINR na nejvyšší možné hodnotě 30 dB a použité nejlepší modulaci v systému LTE, tj. 64-QAM.



Obrázek 4.6: Kvalita signálu



Obrázek 4.7: Propustnost CQI 15



Obrázek 4.8: Použitá modulace

## 5 Zhodnocení naměřených výsledků

Pro testování simulátoru byly vybrány frekvence 800 MHz, 1800MHz a 2100 MHz, Jsou to nejběžnější frekvence používané jak v České republice, tak i v Evropě. Pro frekvenci 800 MHz a šířky kanálu 10 MHz, byly v kapitole 3 vytvořeny z naměřených hodnot grafy pro propustnost a chybovost modelu, pro šířky kanálu 3, 5, 10 a 20 MHz a pro dva typy kanálů. Pro přehlednost byly vždy vykresleny dvě vybrané hodnoty CQI=8 a CQI=15. Pro simulaci všech běžně dostupných hodnot CQI, všech frekvencí a obou přenosových kanálů, jsou přiloženy v přílohách A až DD simulované výsledky.

Pro ověření funkčnosti vytvořeného modelu a aplikovaného pro využití v simulátoru, byly hodnoty CQI=8 a CQI=15 na frekvenci 800 MHz a šířky kanálu 10 MHz ověřeny na reálné síti pomocí mobilního telefonu se softwarem TEMS™.

Jak měření ukázalo, hodnoty simulované ze simulačního prostředí z programu Matlab jsou porovnatelné s menšími odchylky. Pro CQI=8 je hodnota propustnosti ze simulátoru 15 Mbps. Hodnoty přenosové rychlosti pro CQI=8 v reálné síti byly 13,87 Mbps. Hodnota rychlosti je ovlivněna především využitím sítě dalšími účastníky. V simulátoru je propustnost neovlivněna dalším účastníkem. V obou případech je použita modulace 16-QAM odvozená od hodnoty CQI=8. Chybovost odpovídá jak hodnotám ze simulačního modelu, tak i hodnotám z reálné sítě. Pokud se na chybovost podíváme z pohledu AWGN kanálu anebo flat Rayleigh kanálu, chybovosti jsou téměř v obou případech identické.

Další srovnání je při hodnotě CQI=15. Tato hodnota předurčuje použití nejlepší možné modulace 64-QAM, která je v obou porovnávaných případech testů plně využita. Na reálné síti je změřena chybovost 0 %, která je naprosto vynikající. Reflektuje ke kvalitě signálu a hodnotě CQI=15 přenosového kanálu. V případě simulátoru je chybovost stoupající téměř k hodnotě  $10^{-2}$ , což může být zapříčiněné tím, že software TEMS™ při nejvyšší hodnotě CQI=15 a použité 64-QAM modulaci nezobrazuje žádnou chybovost. Může se tedy jednat o chybu zobrazení údajů. Jak je vidět z naměřených hodnot, na reálné síti je propustnost 44,97 Mbps a v simulátoru je hodnota 44 Mbps. Rozdíl hodnot je téměř zanedbatelný a reálná síť dokonce vykazovala o něco větší propustnost.

## Závěr

Úkolem této diplomové práce je návrh modelu přenosové cesty systému LTE pomocí Vienna LTE Link Level Simulator. Jsou zde popsány vlastnosti fyzické vrstvy a vlastnosti přenosového řetězce. Je zde navrhnutý model přenosového řetězce pro downlink režim, tedy v sestupném směru k uživatelskému terminálu. K tomuto účelu slouží softwarové vybavení Matlab R2014a a Vienna LTE simulátor.

Programovatelný kód Vienna LTE simulátoru byl modifikován tak, aby fungoval podle navrhnutého modelu přenosového řetězce, který je navrhnut podle standardu 3GPP. Jedná se tedy o plně standardizovaný přenosový model. Přenosový model se podařil nakonfigurovat tak, aby dokázal v sestupném směru s UE komunikovat. Na tomto modelu se simulovaly dvě nejdůležitější hodnoty, první je hodnota propustnosti a druhá hodnota chybovosti. Jedná se o téměř nejdůležitější parametry, které ovlivňují přenosovou rychlost.

V simulátoru jsou implementovány dva přenosové rádiové kanály, první „AWGN kanál“, který šíří rádiový signál bez jakýchkoliv odrazů. Druhý je „flat Rayleigh kanál“, který pracuje na vícecestném šíření rádiového signálu. V tomto simulátoru můžeme definovat několik vstupních parametrů, jako je frekvence, šířka kanálu, indikátor kvality kanálu (CQI), dále také typ přenosového rádiového kanálu a počet přenesených subrámců ovlivňující rychlost simulace. Vytvořil jsem grafické rozhraní, které zlepšuje ovladatelnost celého simulátoru.

Posledním bodem zadání je otestování řešení a srovnání simulačních výstupů. Simulace na vytvořeném modelu proběhly pro vstupní frekvence, tj. 800 MHz, 1800 MHz a 2100 MHz. Dále pro všechny dostupné šířky přenosového pásma v rozmezí od 1,4 MHz do 20 MHz. Pro oba přenosové rádiové kanály a všechny CQI hodnoty. Naměřené výstupy simulace jsou zakresleny v grafech chybovosti BLER a grafech propustnosti. Hodnota CQI určuje podle chybovosti přenosového kanálu modulační schéma a další parametry.

Simulované hodnoty byly porovnány s reálnou LTE sítí, pomocí telefonu Xperia V se softwarem TEMS<sup>TM</sup> na síti T-Mobile. Pro porovnání byla použita nejběžnější síť v České republice, tj. 800 MHz a šířkou kanálu 10 MHz. Pro srovnání je možné uvést, že měření proběhlo pro hodnoty CQI=8 a CQI=15. Hodnoty pro srovnání se podařily nasimulovat i na reálné síti. Hodnoty se lišily pouze v řádech jednotek Mbps a proto jsem došel k závěru, že navrhnutý model je funkční a poskytuje věrohodné výsledky. V simulátoru se tedy dají simulovat hodnoty, které by bylo nutné odměřit v reálné síti.

V diplomové práci jsem se naučil lépe ovládat software Matlab. Pochopil jsem fungování LTE sítě jako celku. Další implementací rozšířených funkcí do této diplomové práce, jako je technologie MIMO, nový standard LTE Advanced apod. může nastavit nový směr v testování sítí.

## Použitá literatura

- [1] OLSSON, Magnus, Catherine MULLIGAN, Shabnam SULTANA, Stefan ROMMER a Lars FRID. *EPC and 4G packet networks: driving the mobile broadband revolution*. Second edition. Boston: Elsevier/AP, Academic Press is an imprint of Elsevier, 2013. ISBN 012394595X.
- [2] DAHLMAN, Erik, Stefan PARKVALL a Johan SKÖLD. *4G LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Second edition. New York: Elsevier, 2014. ISBN 0124199852.
- [3] COX, Christopher. *An introduction to LTE LTE, LTE-advanced, SAE, VoLTE and 4G mobile communications*. Second edition. West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2014. ISBN 978-1-118-81802-2.
- [4] POOLE, Ian. LTE OFDM, OFDMA SC-FDMA & Modulation. *Http://www.radio-electronics* [online]. USA: radio-electronics.com, 2012 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/lte-long-term-evolution/lte-ofdm-ofdma-scdma.php>
- [5] SRIDHAR, Kamakshi. Introduction to Evolved Packet Core (EPC): EPC Elements, protocols and procedures, USA: *Http://www.cvt-dallas.org* [online]. Director Wireless CTO organization, 2012 [cit. 2016-1-06]. Dostupné z <http://www.cvt-dallas.org/Aug12-Sridhar.pdf>
- [6] Mofreid, Christine. *Http://www.cse.unt.edu* [online]. Alcatel-Lucent Public Relations, 2013 [cit. 2016-2-18]. Dostupné z [http://www.cse.unt.edu/~rdantu/FALL\\_2013\\_WIRELESS\\_NETWORKS/LTE\\_Alcatel\\_White\\_Paper.pdf](http://www.cse.unt.edu/~rdantu/FALL_2013_WIRELESS_NETWORKS/LTE_Alcatel_White_Paper.pdf)
- [7] HUDLIČKA, Martin, Frédéric PYTHOUD a Soumya DASH. Měření výkonové úrovně v LTE systémech. *Http://vyvoj.hw.cz* [online]. CZ: vyvoj.hw.cz, 2016 [cit. 2016-03-01]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/testovani-a-mereni/mereni-vykonove-urovne-v-lte-systemech.html>
- [8] BRÜGGEN, Thomas. LTE Channel State Information (CSI). WIRELESS COMMUNICATIONS, AGILENT TECHNOLOGIES. *ROHDE&SCHWARZ* [online]. USA: ROHDE&SCHWARZ, 2015 [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: [https://cdn.rohde-schwarz.com/magazine/pdfs\\_1/article/203/NEWS\\_203\\_english\\_TS8980.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/magazine/pdfs_1/article/203/NEWS_203_english_TS8980.pdf)
- [9] LTE Quick Reference: CQI. *Http://www.sharetechnote.com* [online]. USA: sharetechnote.com, 2014 [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: [http://www.sharetechnote.com/html/Handbook\\_LTE\\_CQI.html](http://www.sharetechnote.com/html/Handbook_LTE_CQI.html)
- [10] FRASER, Sandy. LTE Channel State Information (CSI). WIRELESS COMMUNICATIONS, AGILENT TECHNOLOGIES. *Http://www.keysight.com* [online]. USA: Agilent Technologies, 2012 [cit. 2016-03-22]. Dostupné z: [http://www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/All/31May2012\\_LTE.pdf](http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/31May2012_LTE.pdf)
- [11] MCCOY, Wes. Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer. USA: *Http://www.freescale.com* [online]. USA: Freescale, 2007 [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: [https://www.nxp.com/files/wireless\\_comm/doc/white\\_paper/3GPPEVOLUTIONWP.pdf](https://www.nxp.com/files/wireless_comm/doc/white_paper/3GPPEVOLUTIONWP.pdf)

- [12] MICHALEK, Libor a Roman ŠEBESTA. *Rádiové sítě II pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2014, ISBN 978-80-248-3559-4.*
- [13] ZARRINKOUB, Houman. *Understanding LTE with MATLAB: from mathematical foundation to simulation and prototyping.* Chichester, England: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-44343-9.
- [14] KARBAN, Pavel. *Výpočty a simulace v programech Matlab a Simulink.* Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2006. ISBN 80-251-1301-9.
- [15] HARQ Entity/Process. *Http://www.sharetechnote.com* [online]. USA: Sharetechnote, 2013 [cit. 2016-03-29]. Dostupné z: [http://www.sharetechnote.com/html/BasicProcedure\\_LTE\\_HARQ.html](http://www.sharetechnote.com/html/BasicProcedure_LTE_HARQ.html)
- [16] Vienna LTE simulators: *LTE link level simulator, Institute of Telecommunications, Vienna University of Technology, Austria.* [online]. [cit. 2016-04-01]. Dostupné z: <https://www.nt.tuwien.ac.at/downloads/>

# Seznam příloh

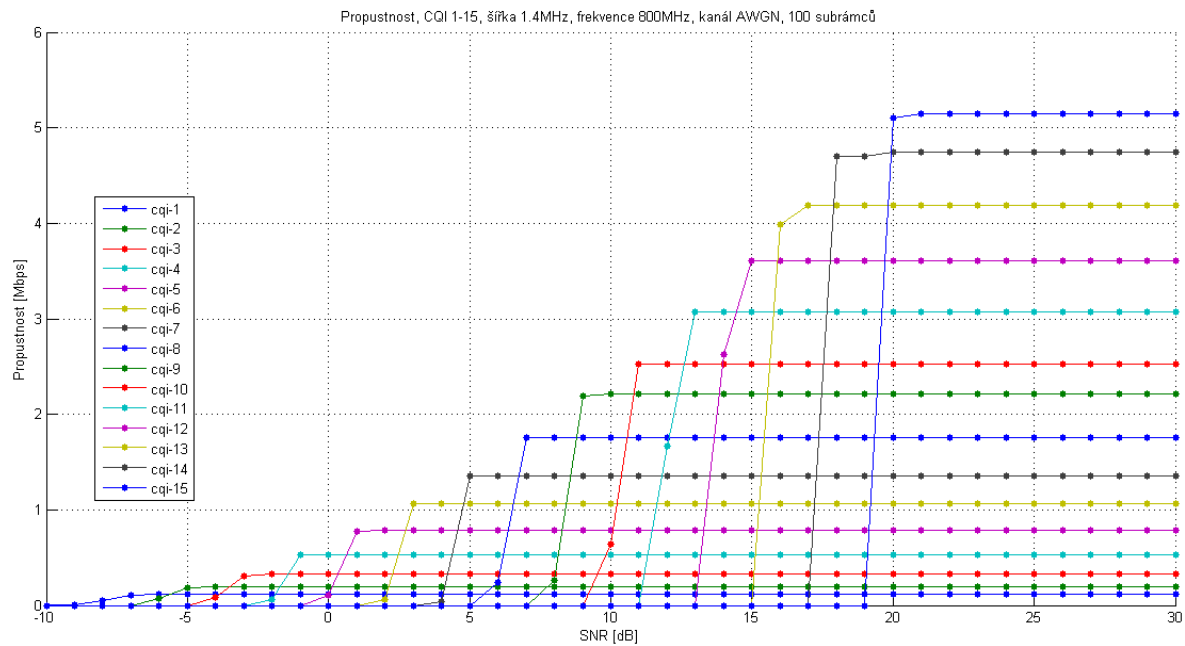
Seznam příloh je pojmenován podle nastavených parametrů simulace:

Příloha A:	AWGN, šířka kanálu 1.4MHz, frekvence 800MHz, CQI 1-15.....	I
Příloha B:	AWGN, šířka kanálu 3MHz, frekvence 800MHz, CQI 1-15.....	II
Příloha C:	AWGN, šířka kanálu 5MHz, frekvence 800MHz, CQI 1-15.....	III
Příloha D:	AWGN, šířka kanálu 10MHz, frekvence 800MHz, CQI 1-15.....	IV
Příloha E:	AWGN, šířka kanálu 20MHz, frekvence 800MHz, CQI 1-15.....	V
Příloha F:	AWGN, šířka kanálu 1.4MHz, frekvence 1800MHz, CQI 1-15.....	VI
Příloha G:	AWGN, šířka kanálu 3MHz, frekvence 1800MHz, CQI 1-15.....	VII
Příloha H:	AWGN, šířka kanálu 5MHz, frekvence 1800MHz, CQI 1-15.....	VIII
Příloha I:	AWGN, šířka kanálu 10MHz, frekvence 1800MHz, CQI 1-15.....	IX
Příloha J:	AWGN, šířka kanálu 20MHz, frekvence 1800MHz, CQI 1-15.....	X
Příloha K:	AWGN, šířka kanálu 1.4MHz, frekvence 2100MHz, CQI 1-15.....	XI
Příloha L:	AWGN, šířka kanálu 3MHz, frekvence 2100MHz, CQI 1-15.....	XII
Příloha M:	AWGN, šířka kanálu 5MHz, frekvence 2100MHz, CQI 1-15.....	XIII
Příloha N:	AWGN, šířka kanálu 10MHz, frekvence 2100MHz, CQI 1-15.....	XIV
Příloha O:	AWGN, šířka kanálu 20MHz, frekvence 2100MHz, CQI 1-15.....	XV
Příloha P:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 1.4MHz, frekvence 800MHz, CQI 1-15.....	XVI
Příloha Q:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 3MHz, frekvence 800MHz, CQI 1-15.....	XVII
Příloha R:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 5MHz, frekvence 800MHz, CQI 1-15.....	XVIII
Příloha S:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 10MHz, frekvence 800MHz, CQI 1-15.....	XIX
Příloha T:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 20MHz, frekvence 800MHz, CQI 1-15.....	XX
Příloha U:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 1.4MHz, frekvence 1800MHz, CQI 1-15.....	XXI
Příloha V:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 3MHz, frekvence 1800MHz, CQI 1-15.....	XXII
Příloha W:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 5MHz, frekvence 1800MHz, CQI 1-15.....	XXIII
Příloha X:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 10MHz, frekvence 1800MHz, CQI 1-15.....	XXIV
Příloha Y:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 20MHz, frekvence 1800MHz, CQI 1-15.....	XXV
Příloha Z:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 1.4MHz, frekvence 2100MHz, CQI 1-15.....	XXVI
Příloha AA:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 3MHz, frekvence 2100MHz, CQI 1-15.....	XXVII
Příloha BB:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 5MHz, frekvence 2100MHz, CQI 1-15.....	XXVIII
Příloha CC:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 10MHz, frekvence 2100MHz, CQI 1-15.....	XXIX
Příloha DD:	Flat Rayleigh, šířka kanálu 20MHz, frekvence 2100MHz, CQI 1-15.....	XXX

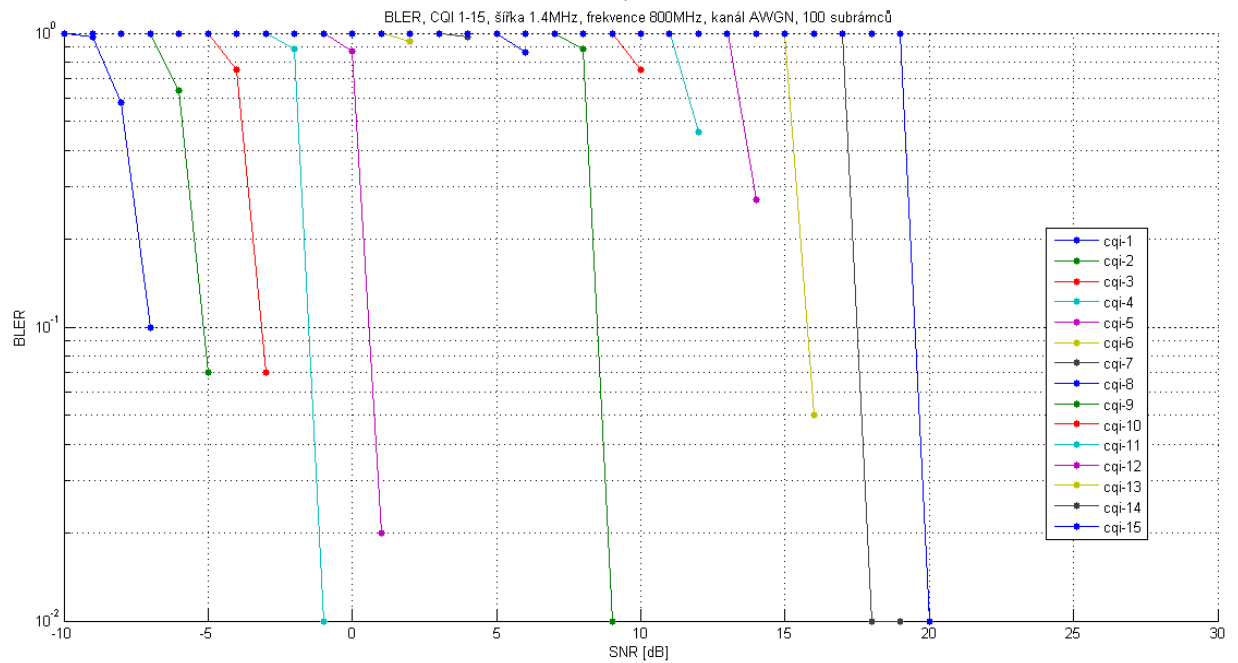
Adresářová struktura ZIP archívu: LTE\_Link\_Level/vysledky

LTE\_Link\_Level/[soubory simulátoru]

Graf A.1: Propustnost

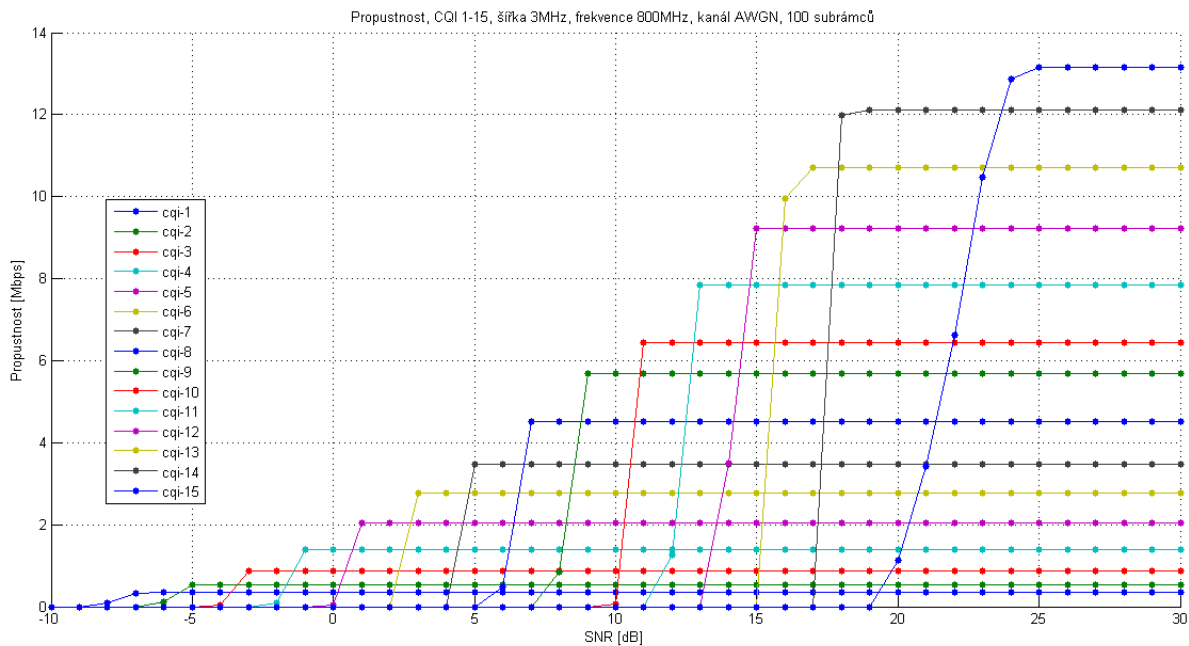


Graf A.2: Chybovost

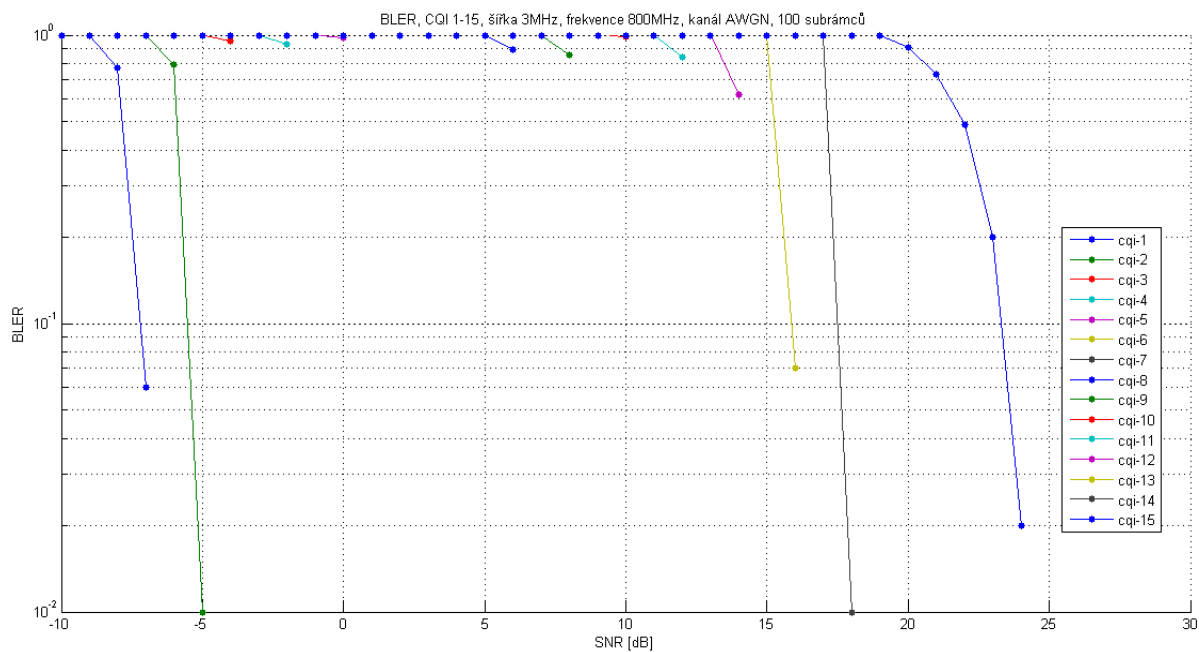




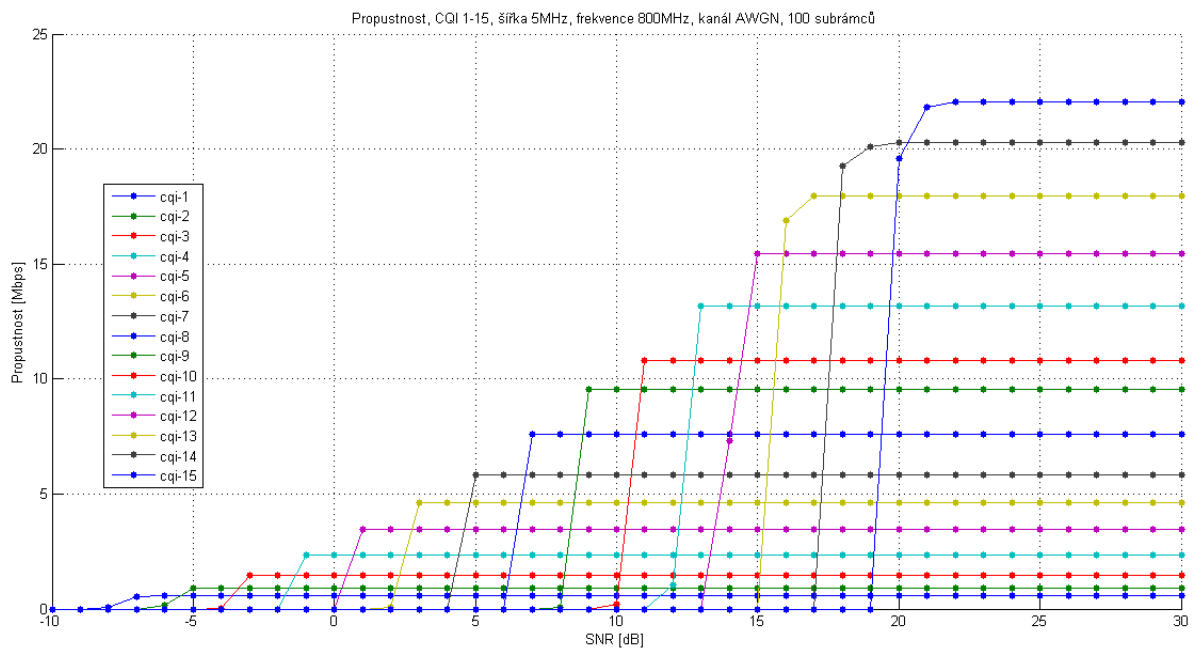
Graf B.1: *Propustnost*



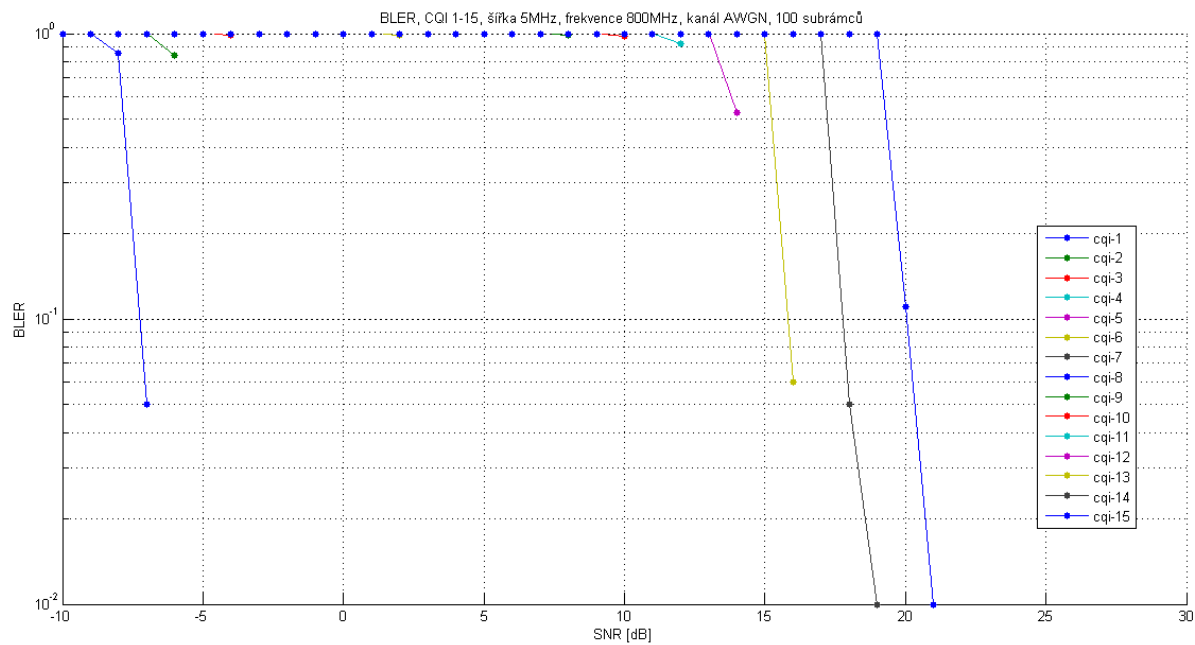
Graf B.2: *Chybovost*



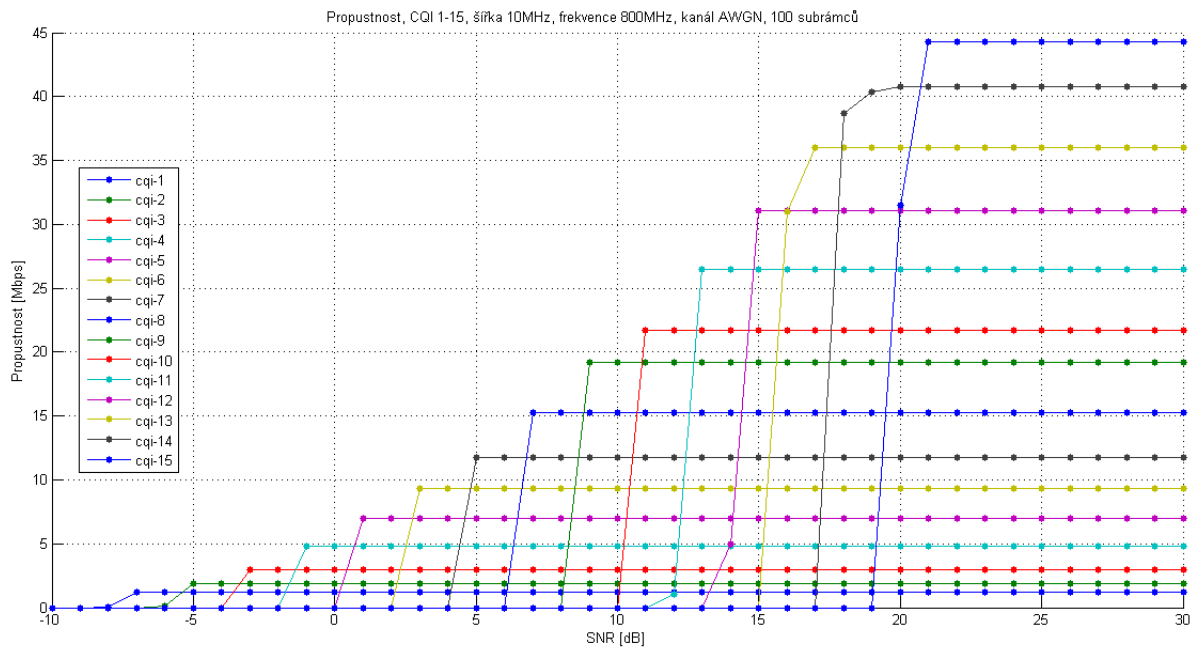
Graf C.1: Propustnost



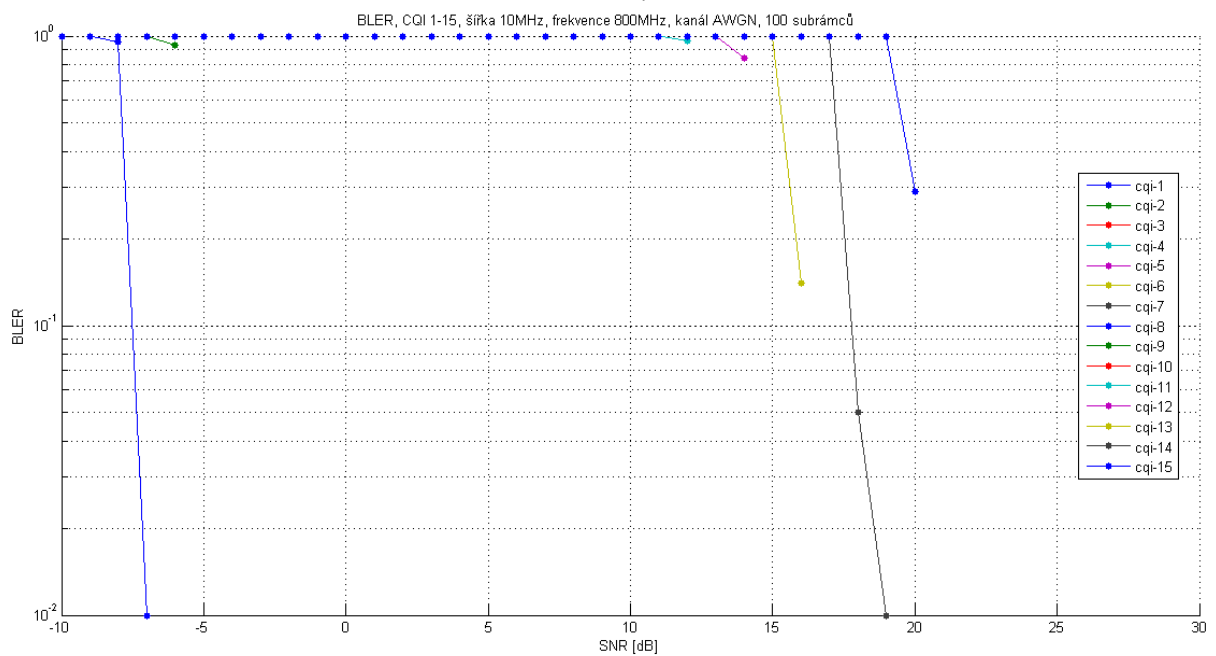
Graf C.2: Chybovost



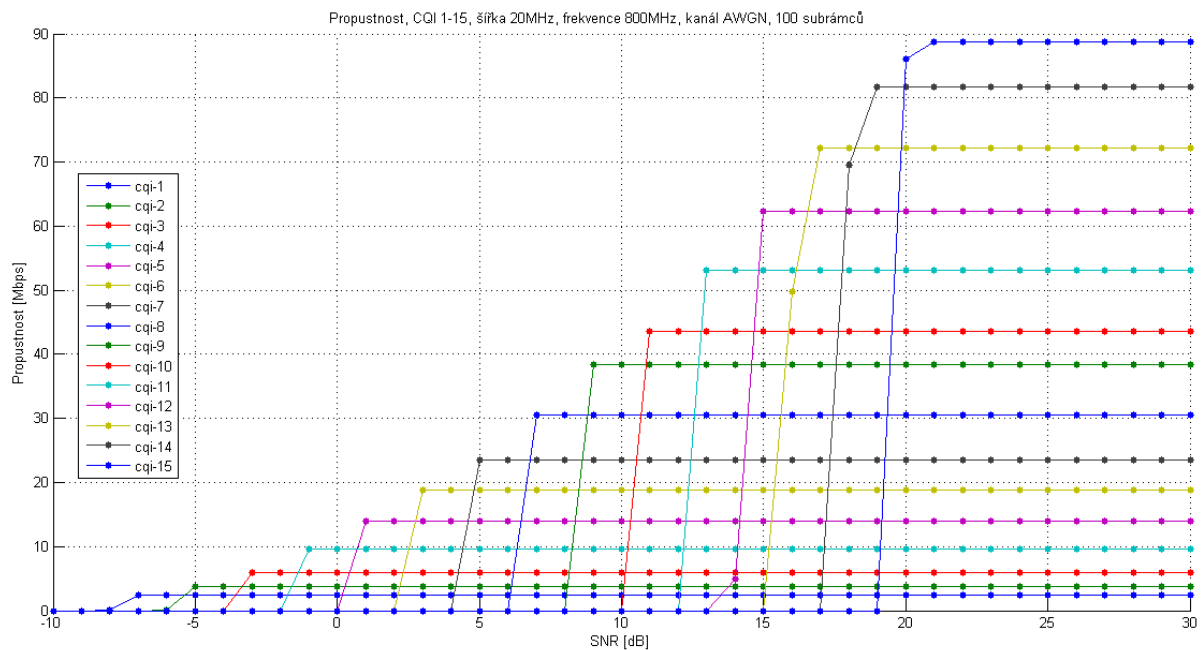
Graf D.1: *Propustnost*



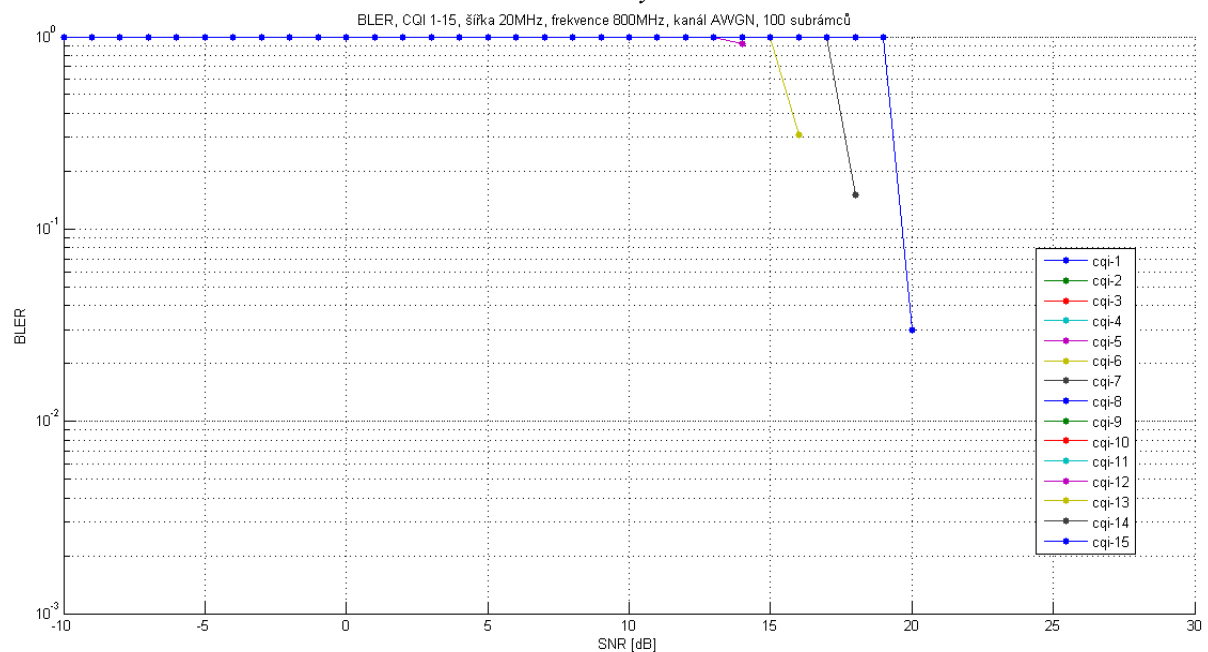
Graf D.2: *Chybovost*



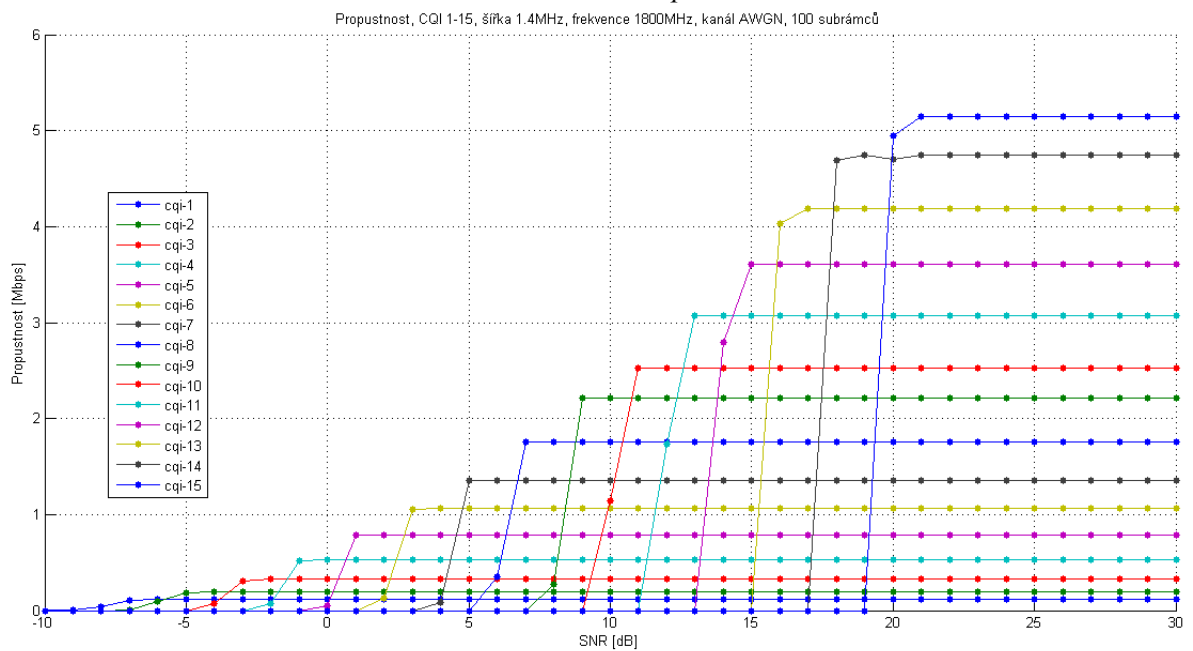
Graf E.1: *Propustnost*



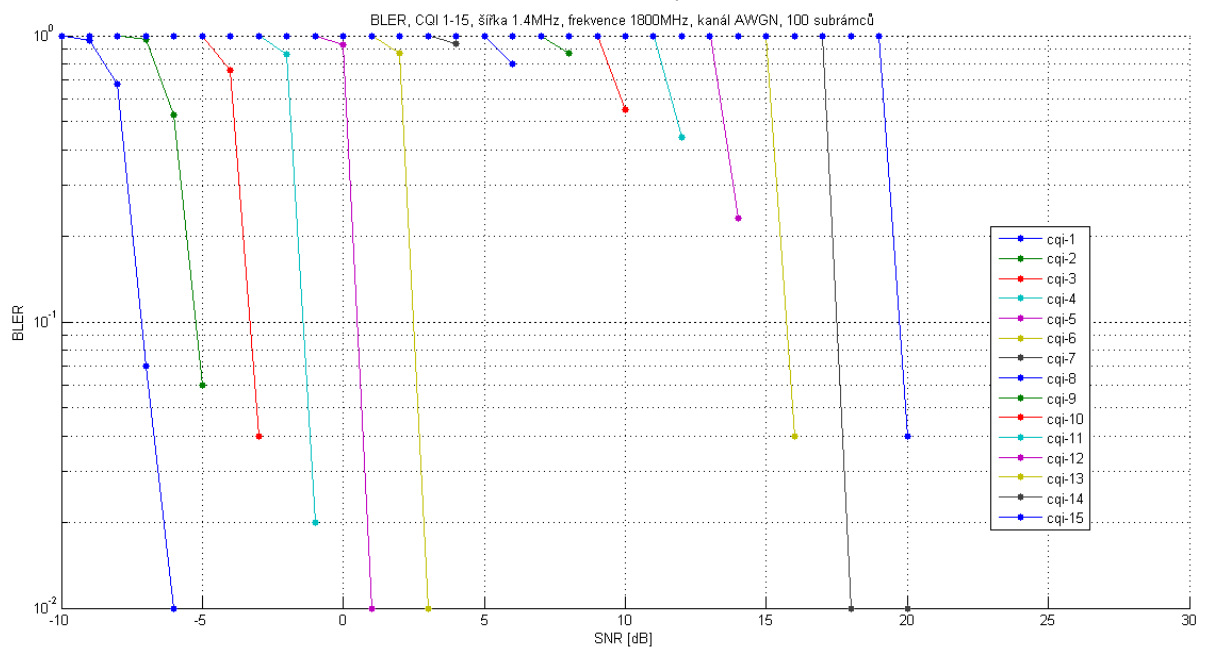
Graf E.2: *Chybovost*



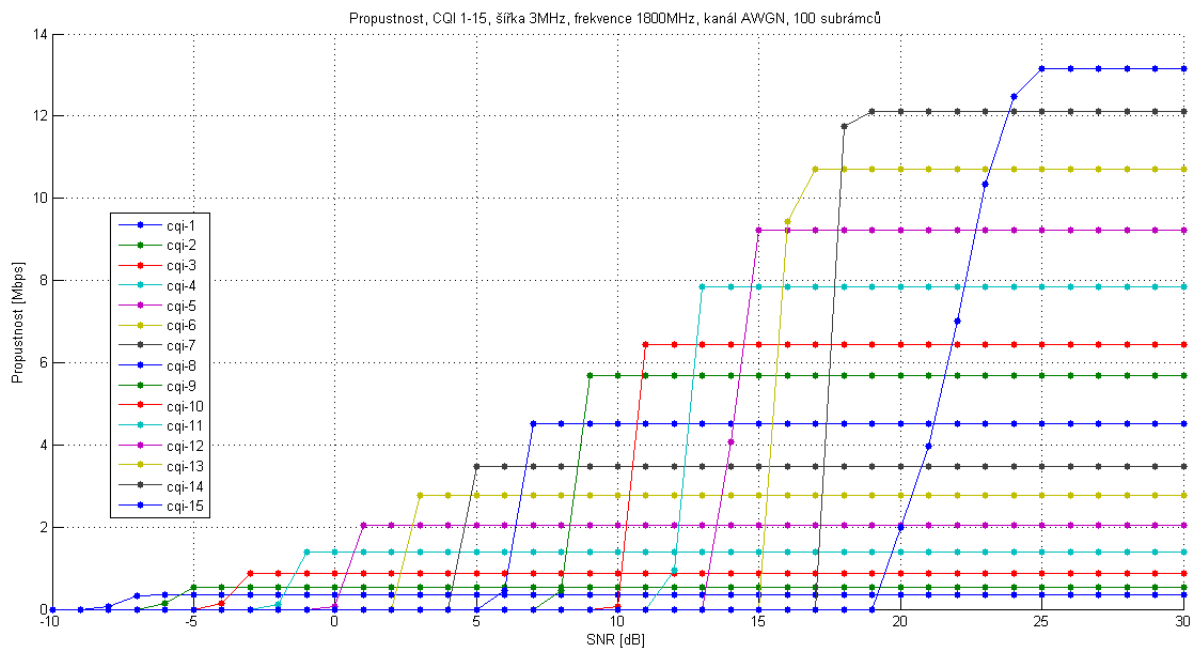
Graf F.1: *Propustnost*



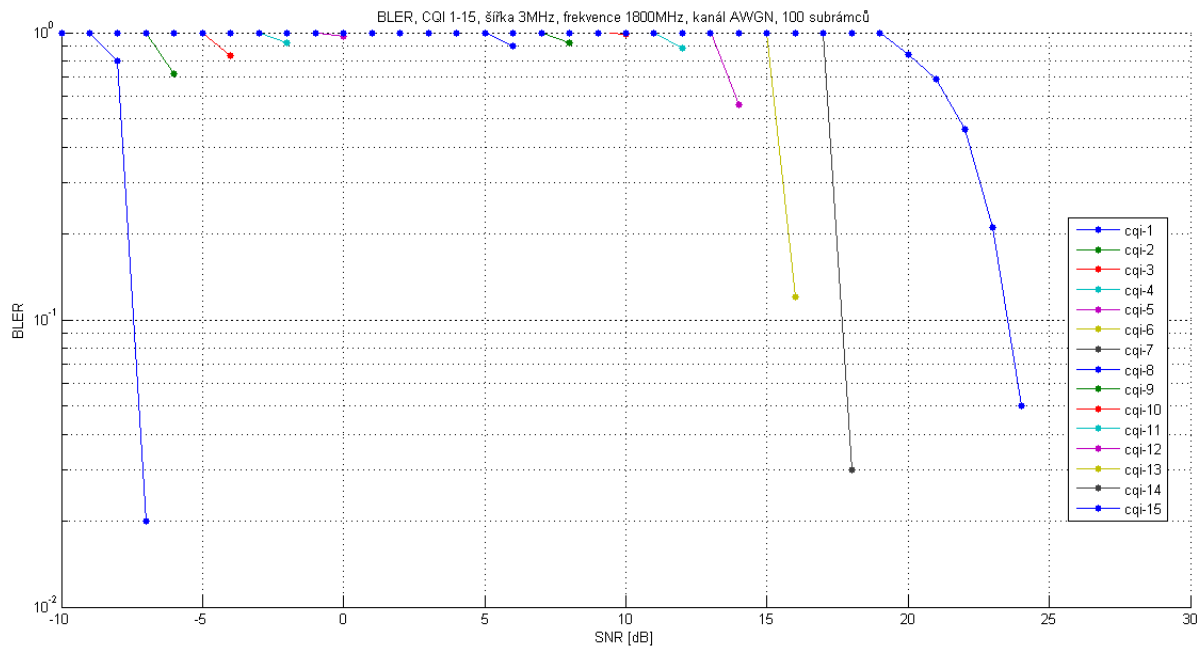
Graf F.2: *Chybovost*



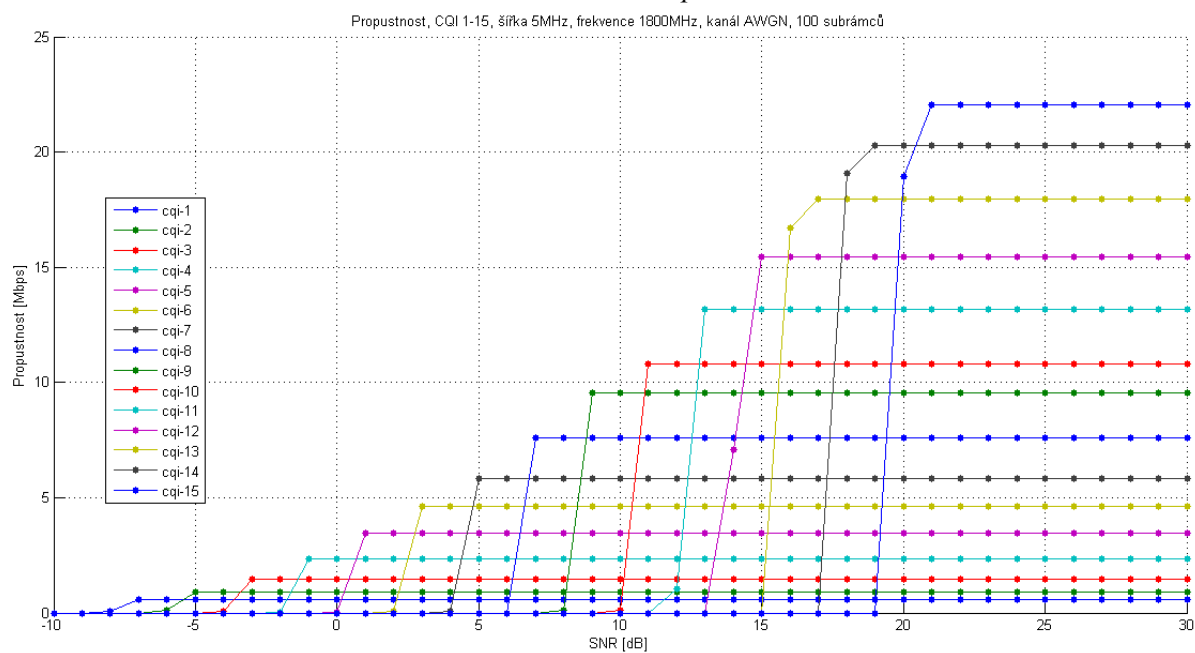
Graf G.1: *Propustnost*



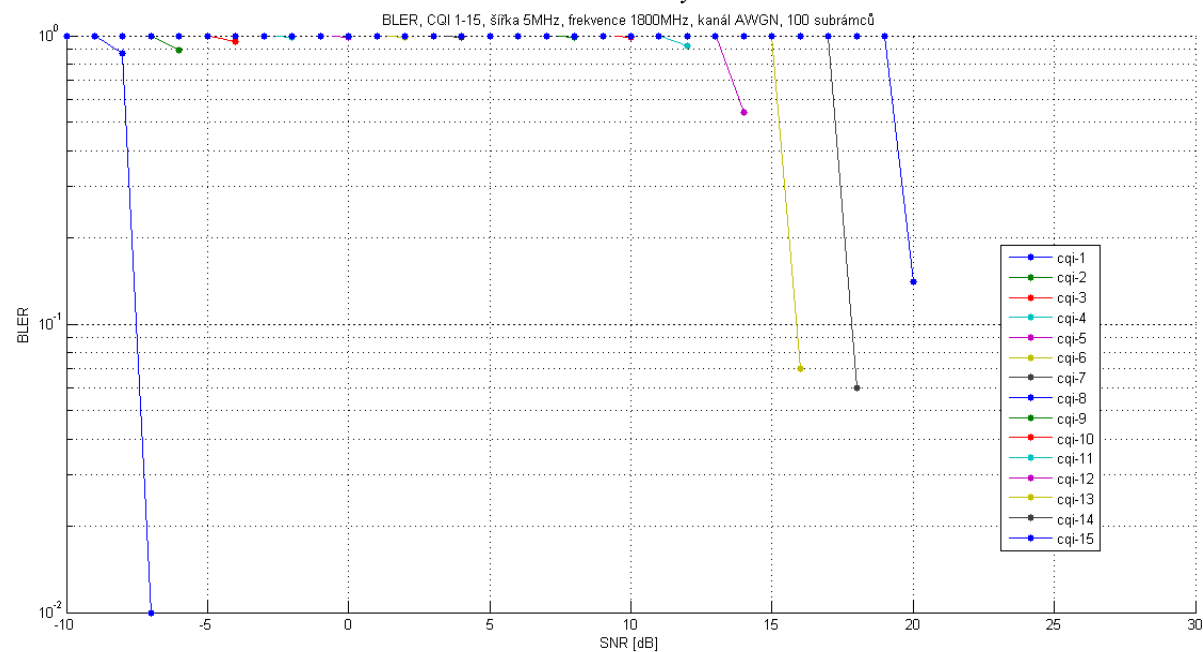
Graf G.2: *Chybovost*



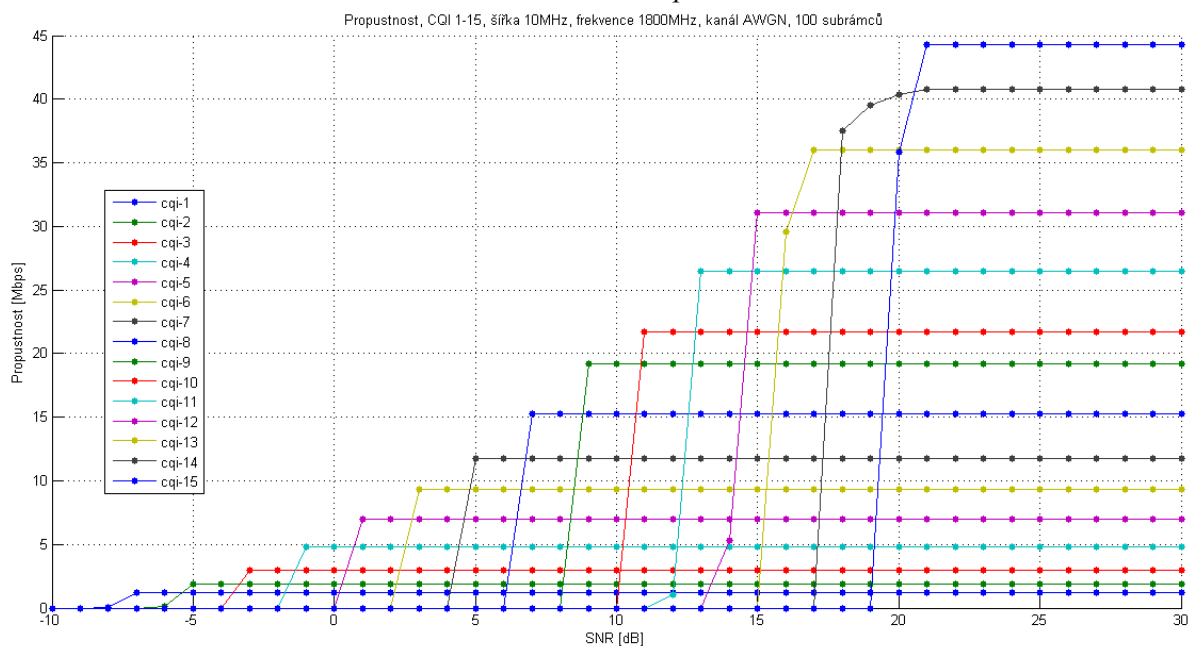
Graf H.1: *Propustnost*



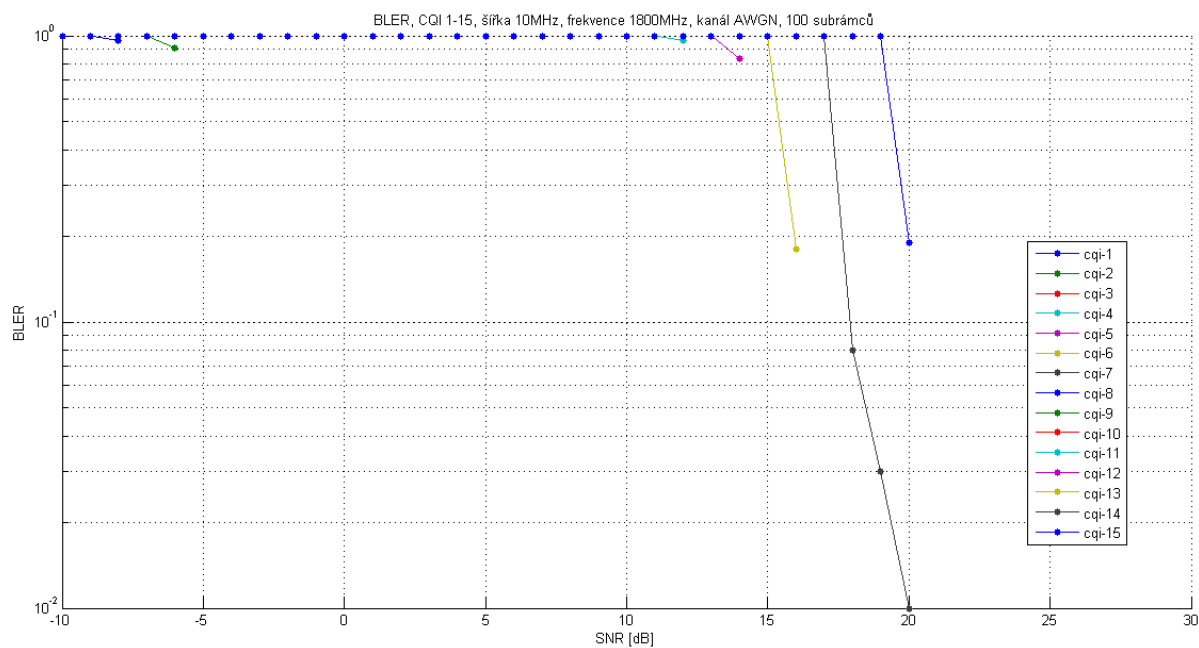
Graf H.2: *Chybovost*



Graf I.1: *Propustnost*

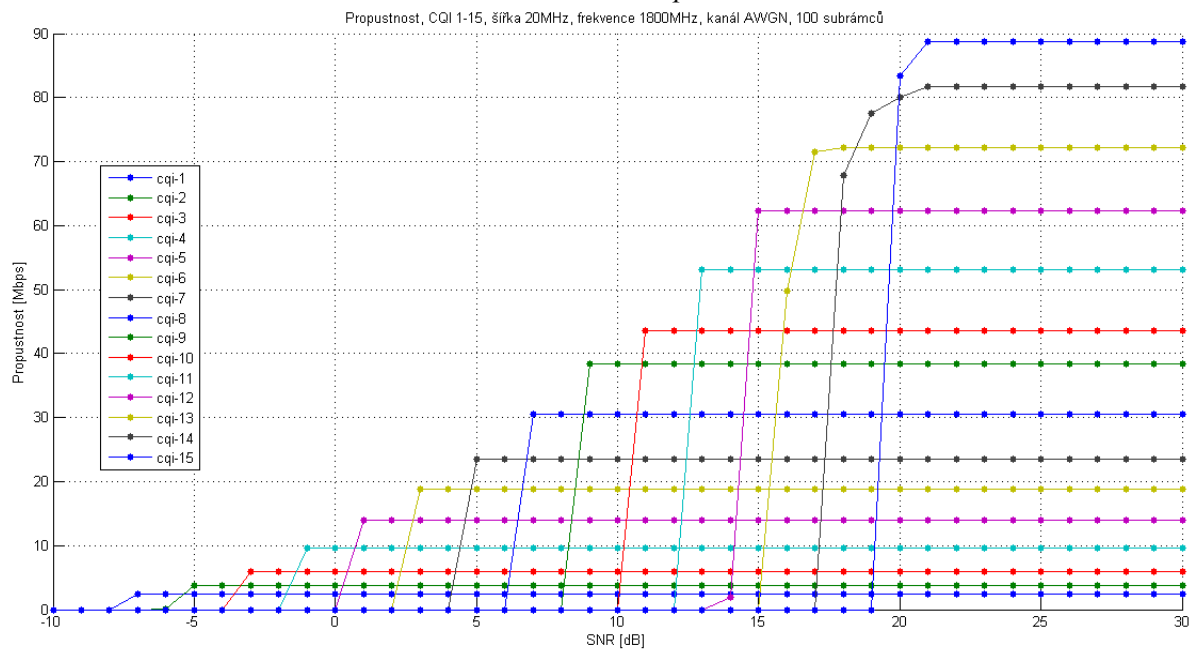


Graf I.2: *Chybovost*

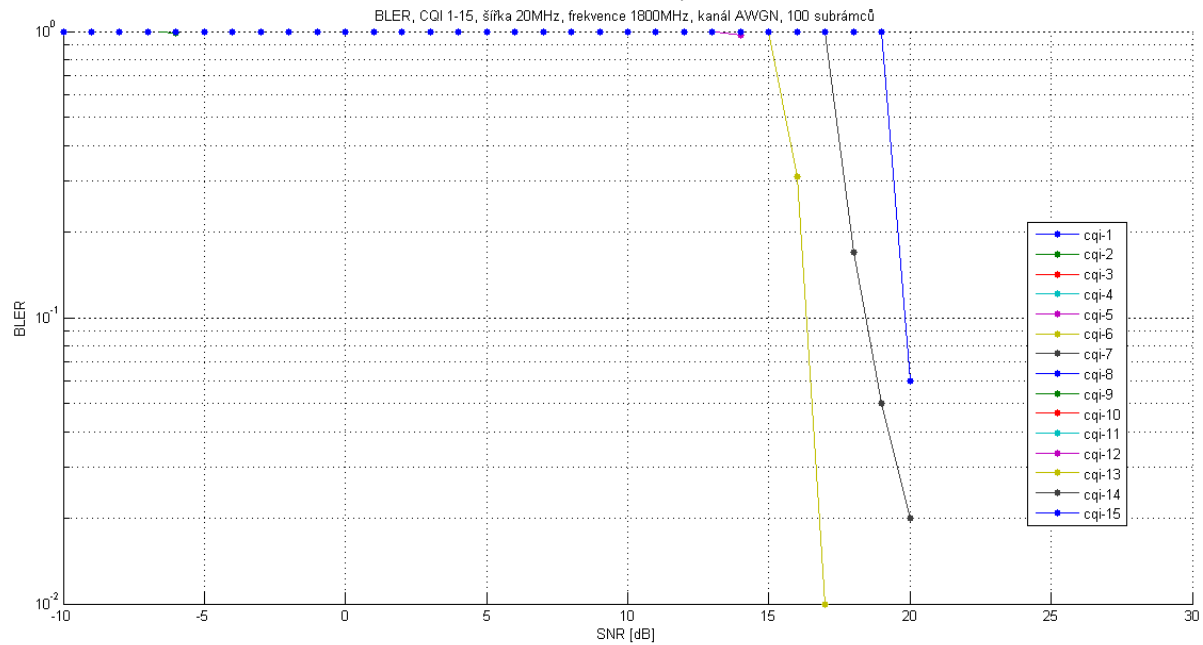




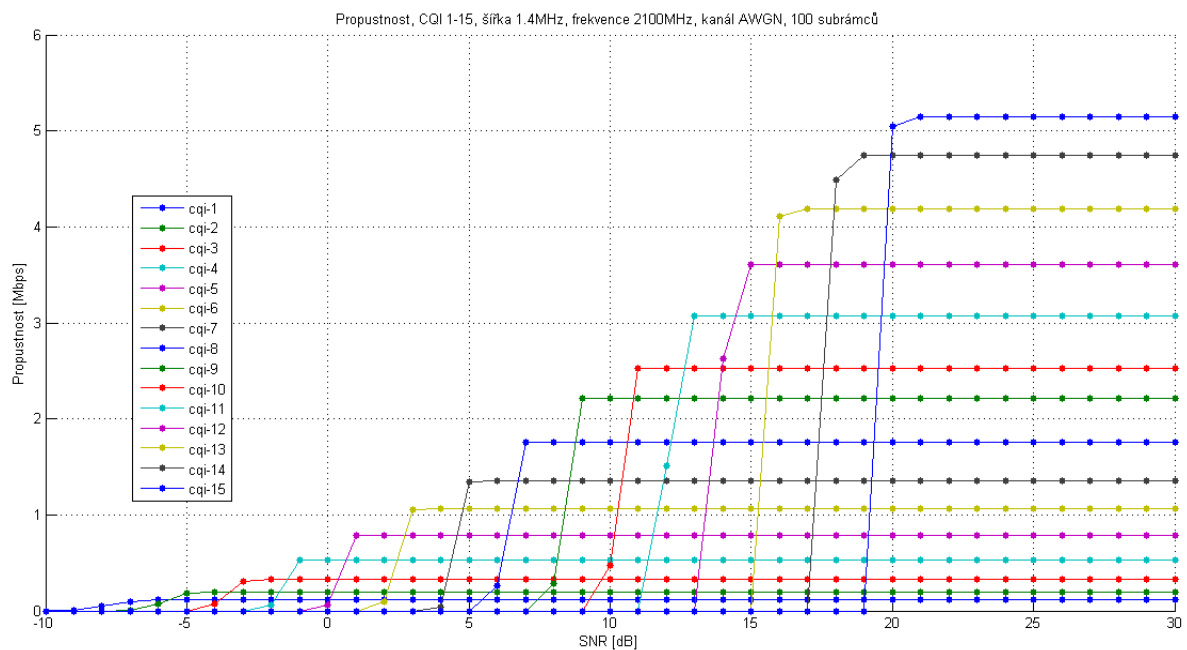
Graf J.1: *Propustnost*



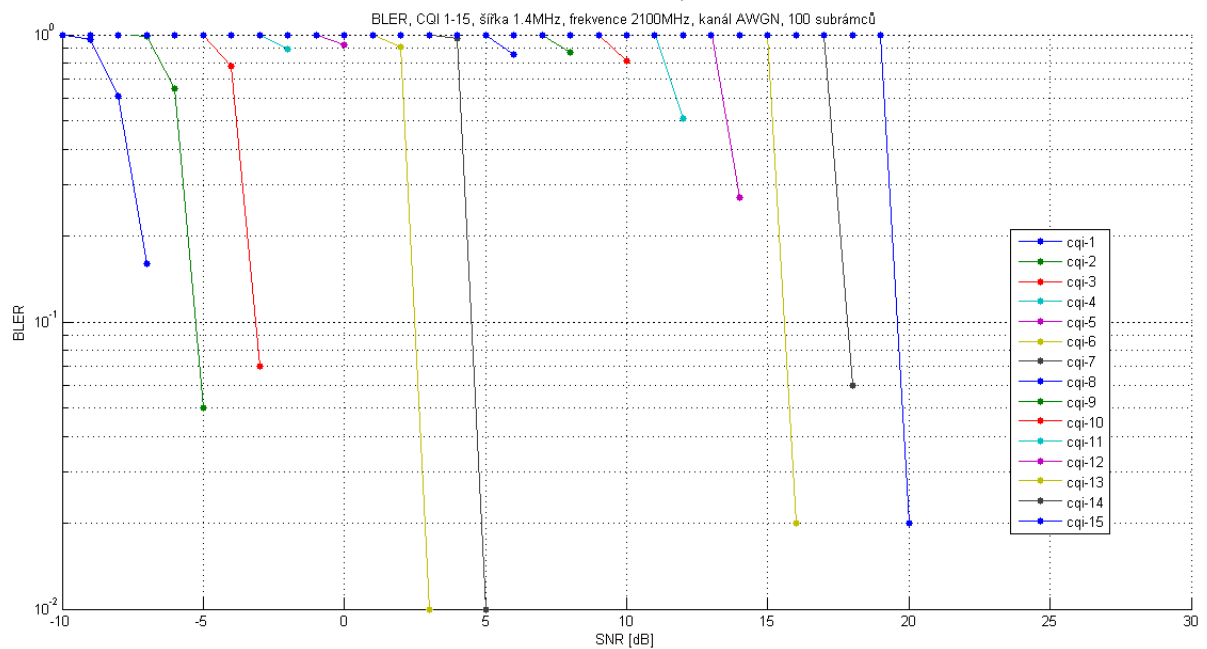
Graf J.2: *Chybovost*



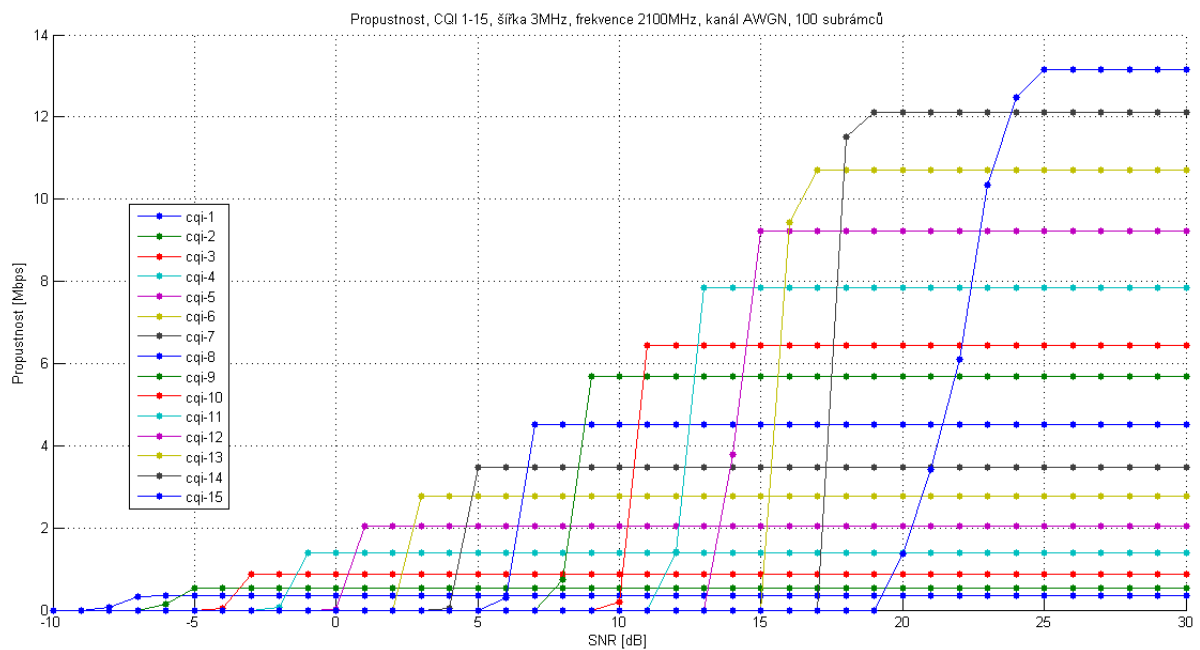
Graf K.1: Propustnost



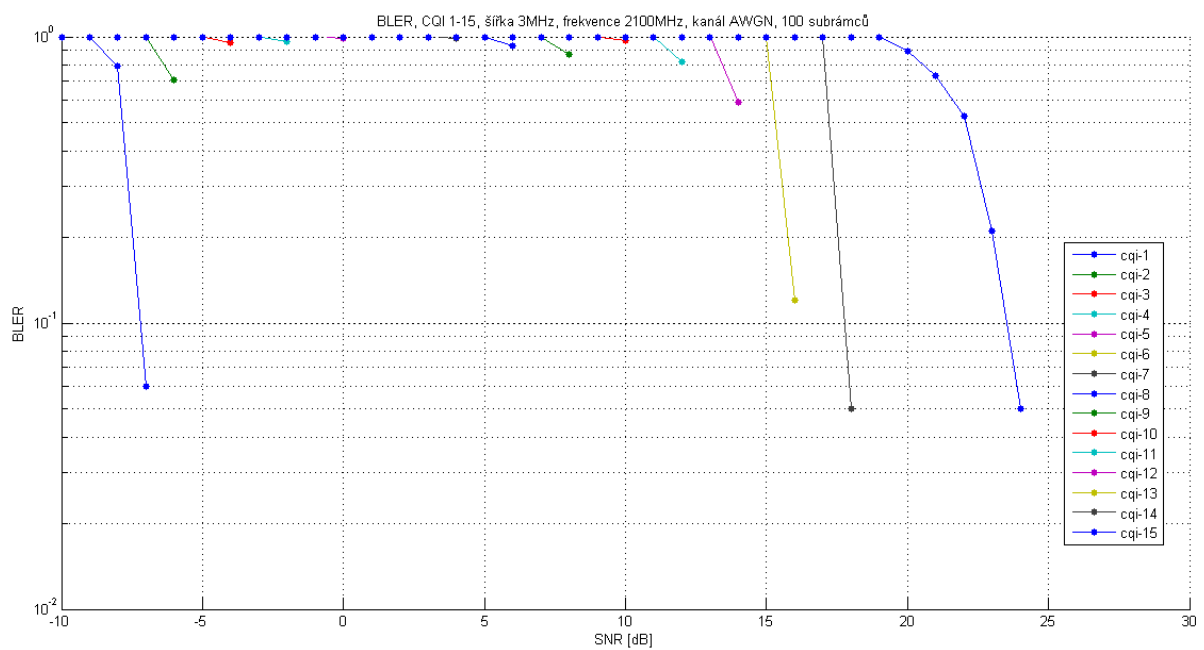
Graf K.2: Chybovost



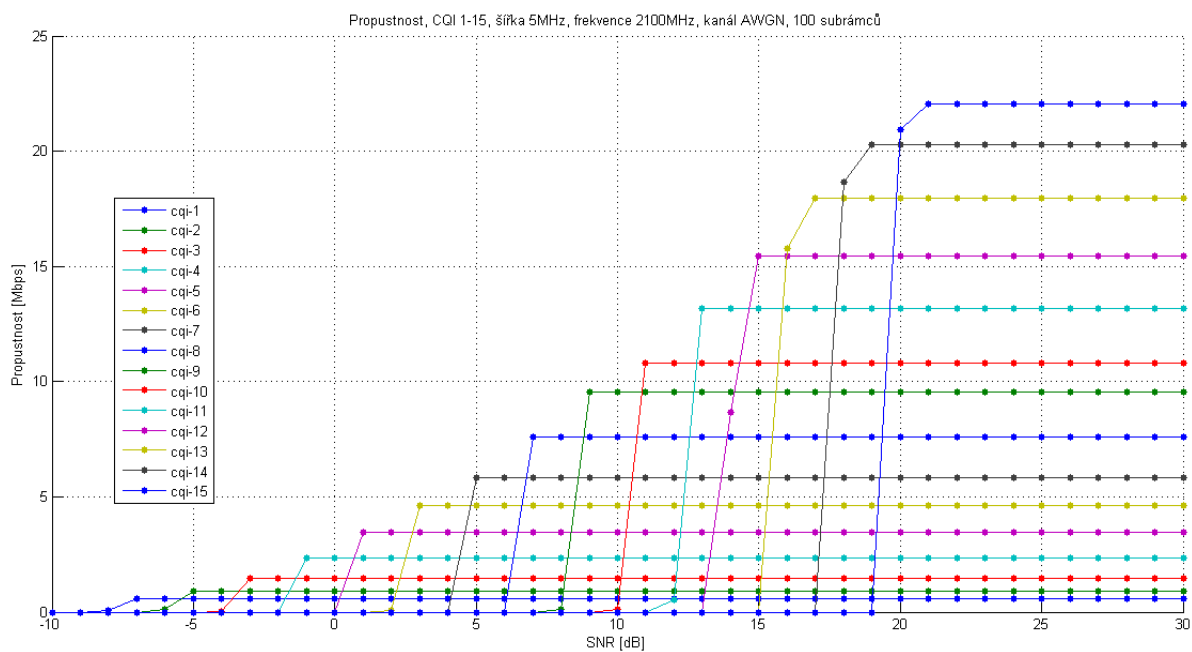
Graf L.1: *Propustnost*



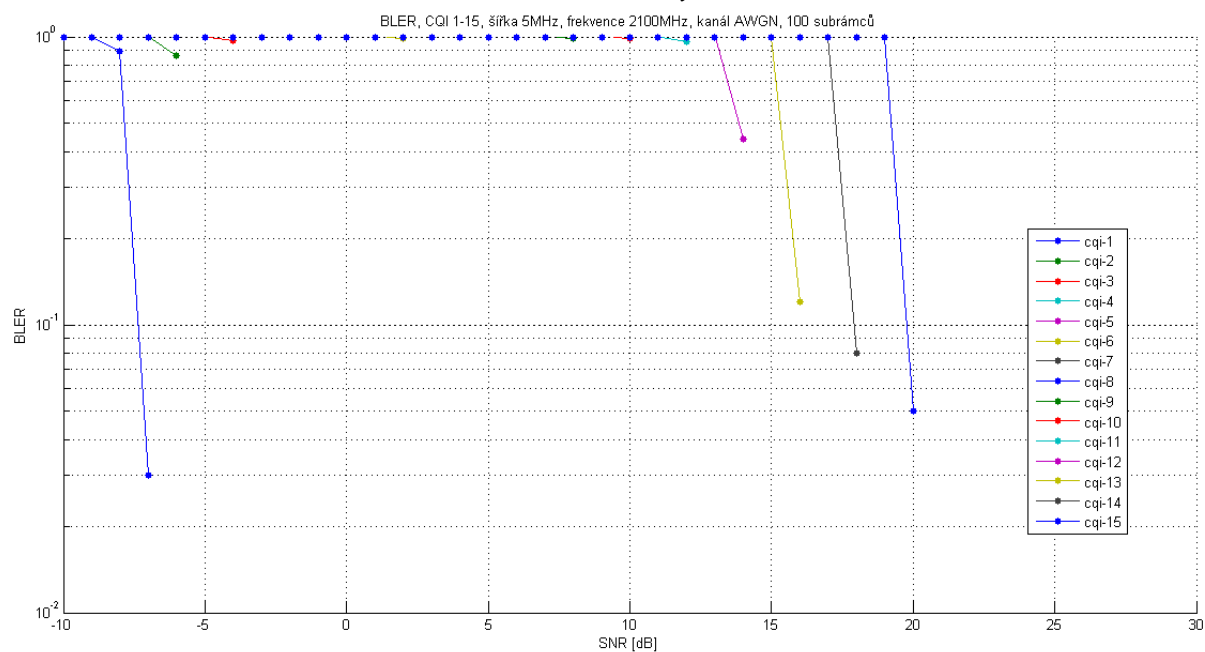
Graf L.2: *Chybovost*



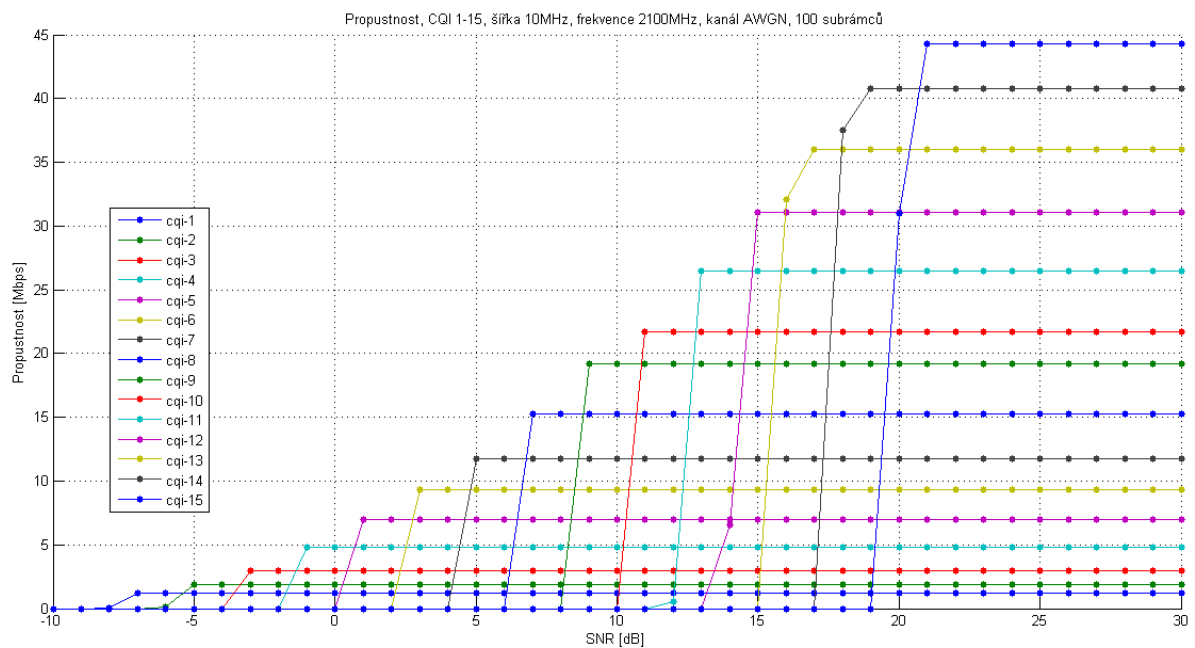
Graf M.1: *Propustnost*



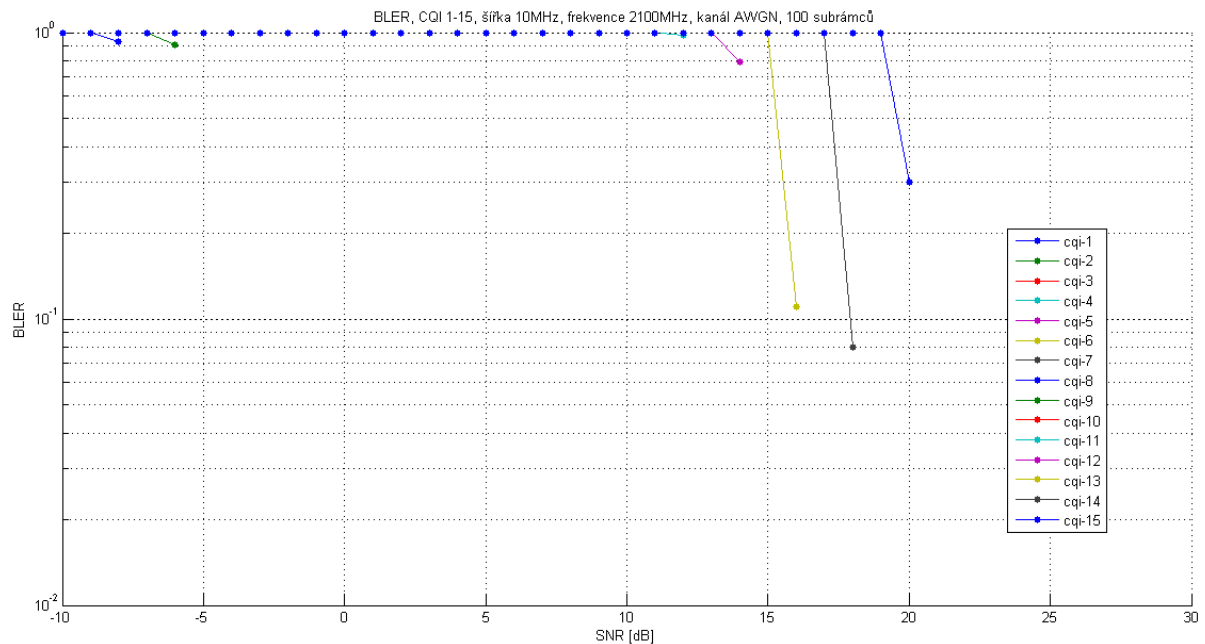
Graf M.2: *Chybovost*



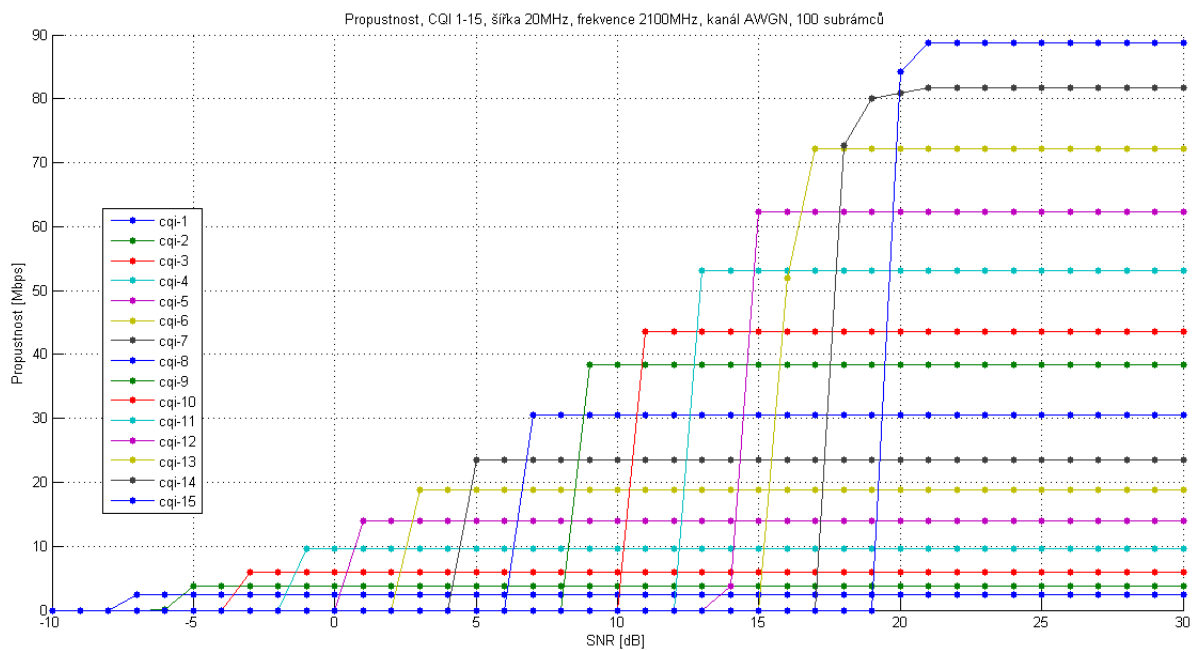
Graf N.1: *Propustnost*



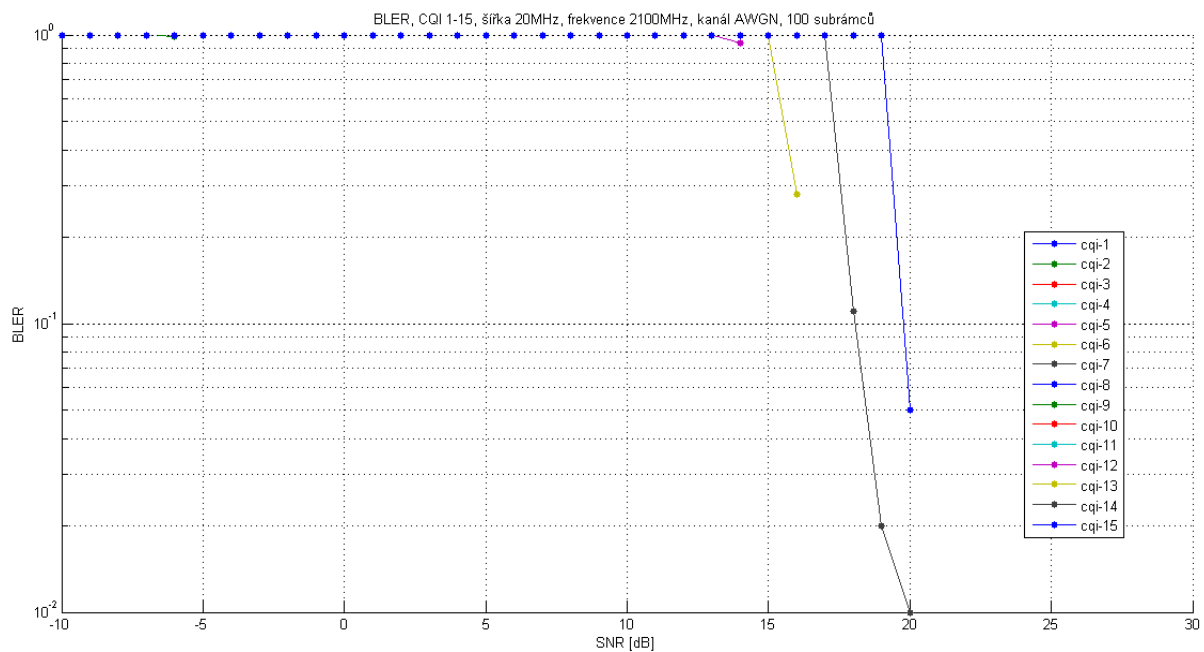
Graf N.2: *Chybovost*



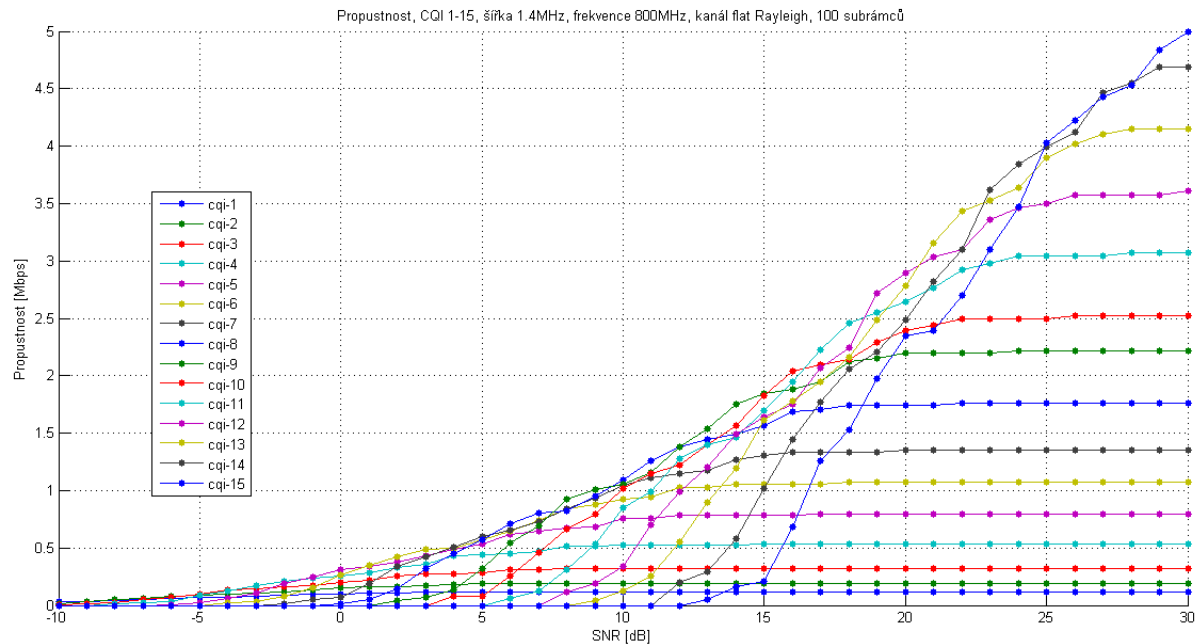
Graf O.1: *Propustnost*



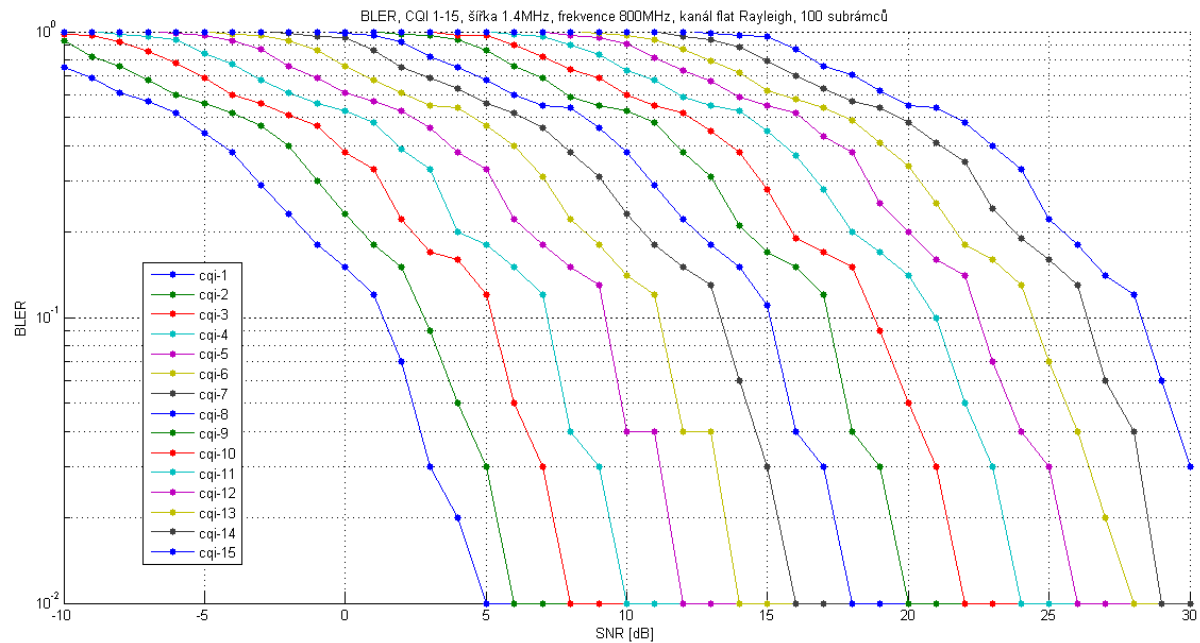
Graf O.2: *Chybovost*



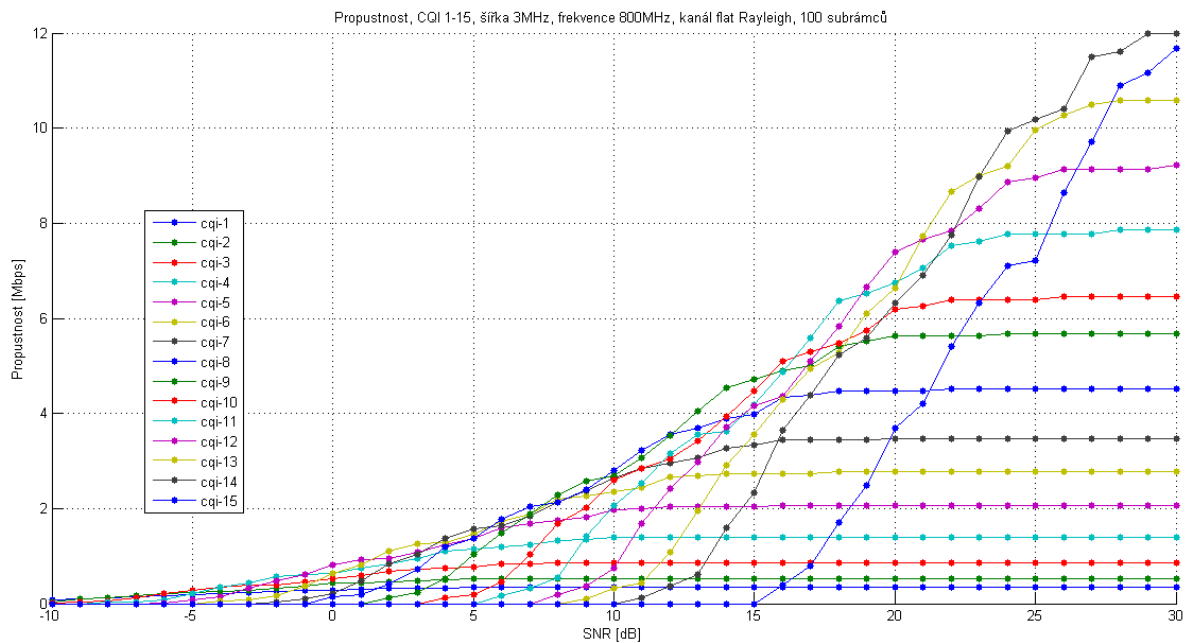
Graf P.1: Propustnost



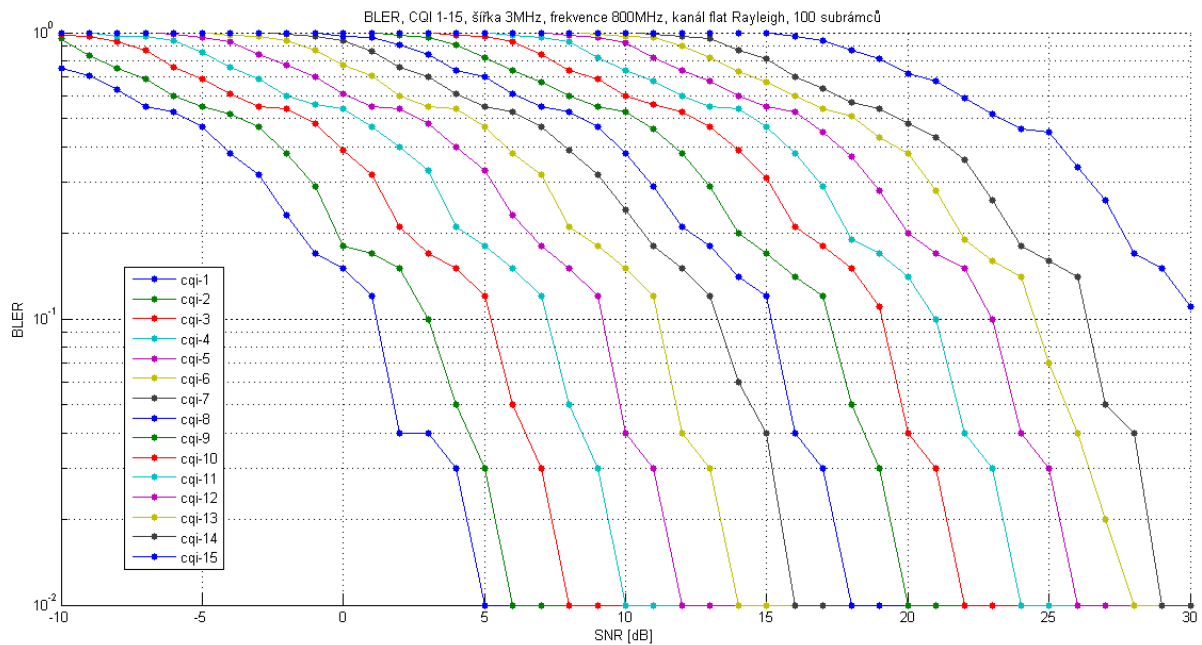
Graf P.2: Chybovost



Graf Q.1: Propustnost

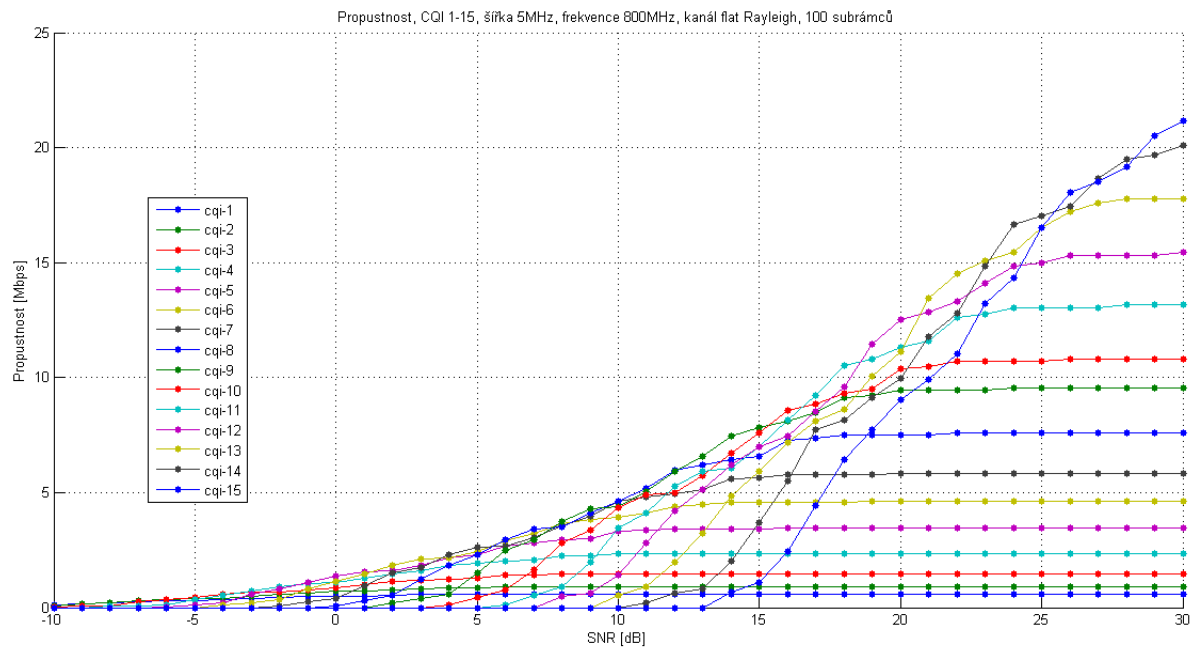


Graf Q.2: Chybovost

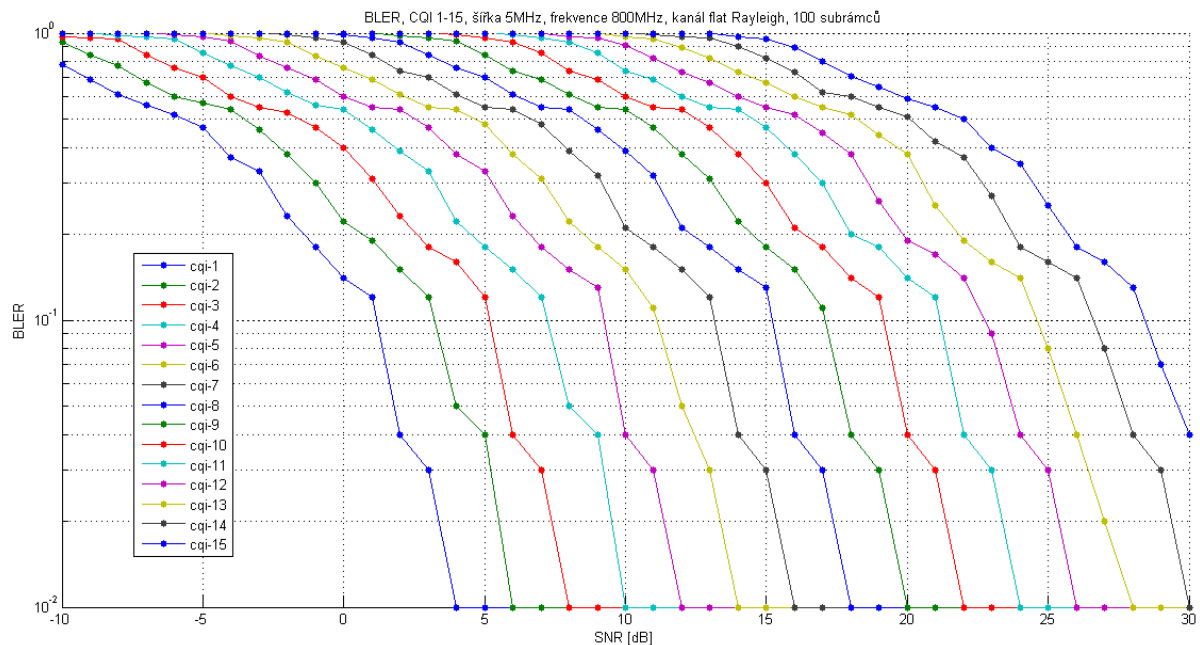




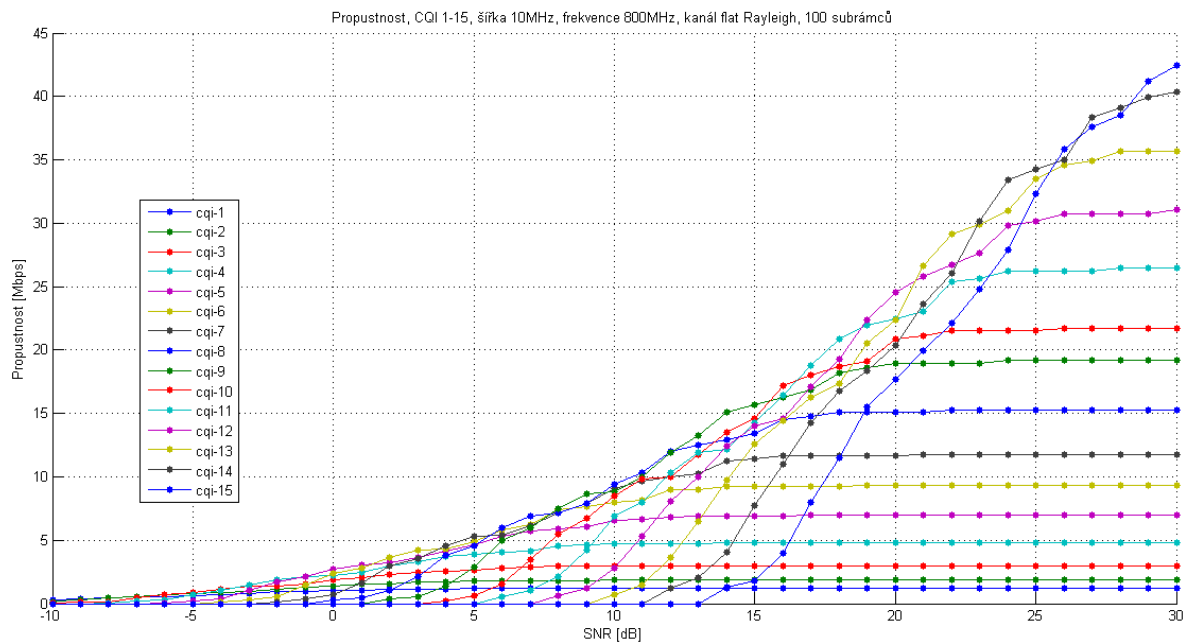
Graf R.1: Propustnost



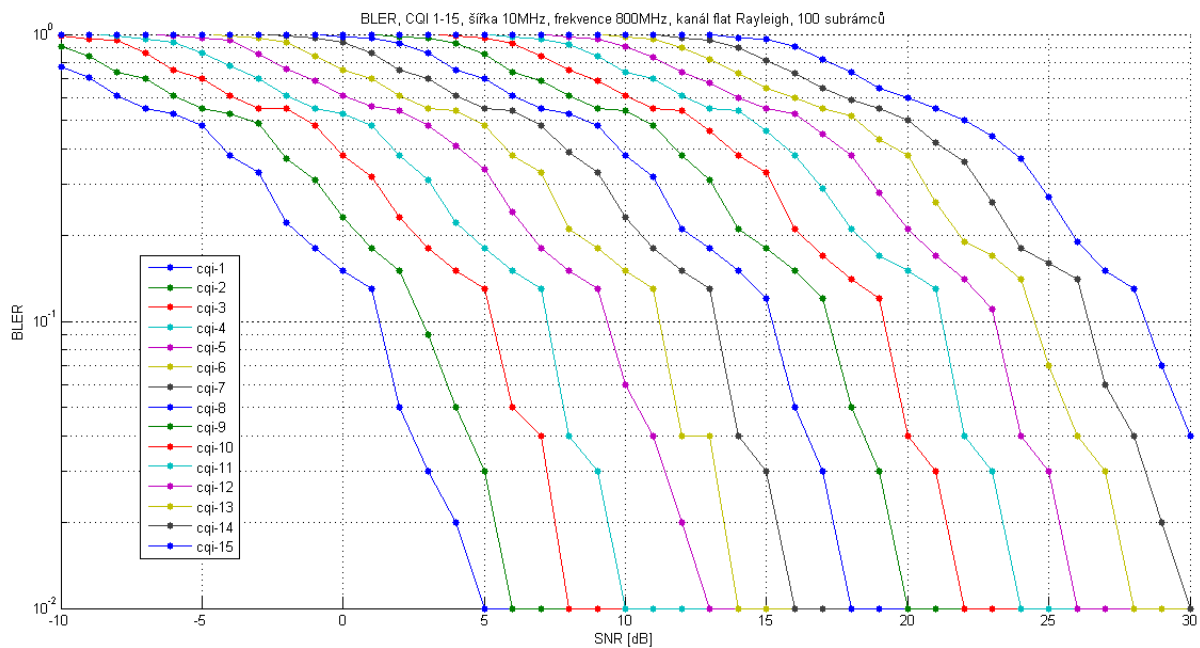
Graf R.2: Chybovost



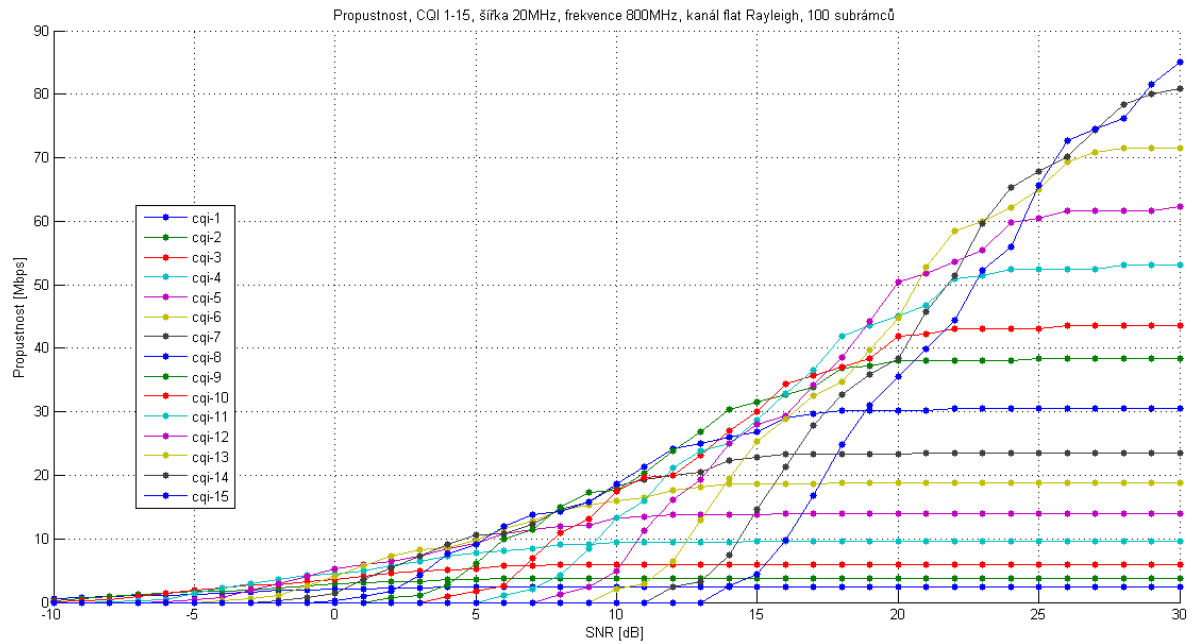
Graf S.1: Propustnost



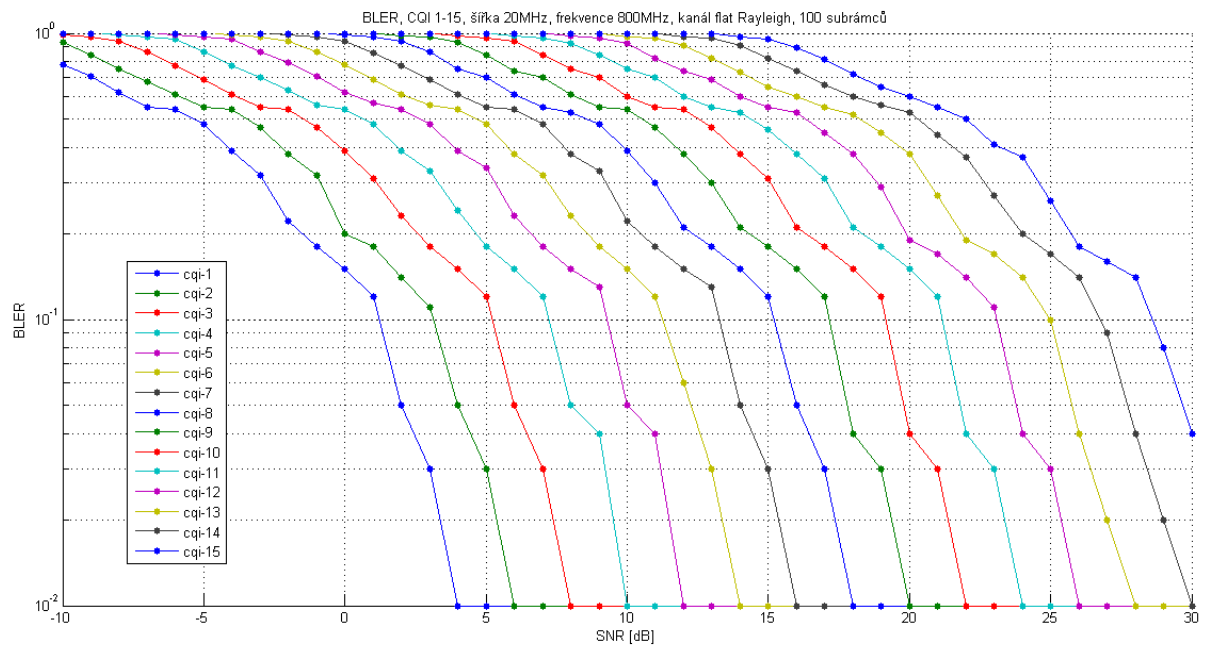
Graf S.2: Chybovost



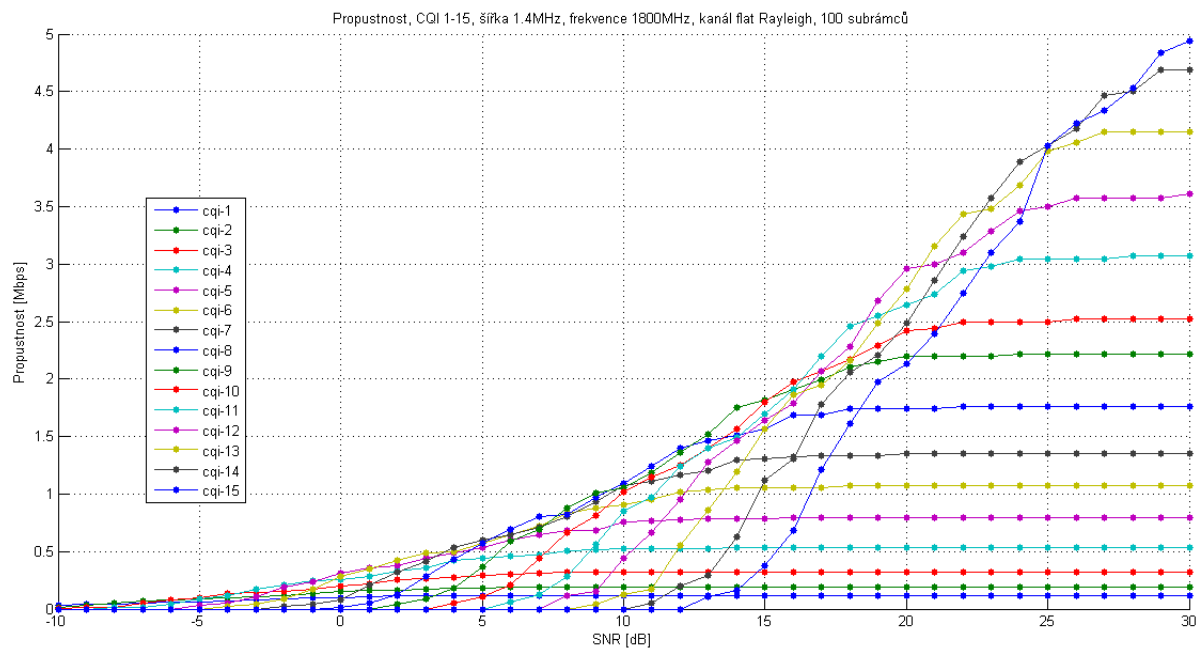
Graf T.1: Propustnost



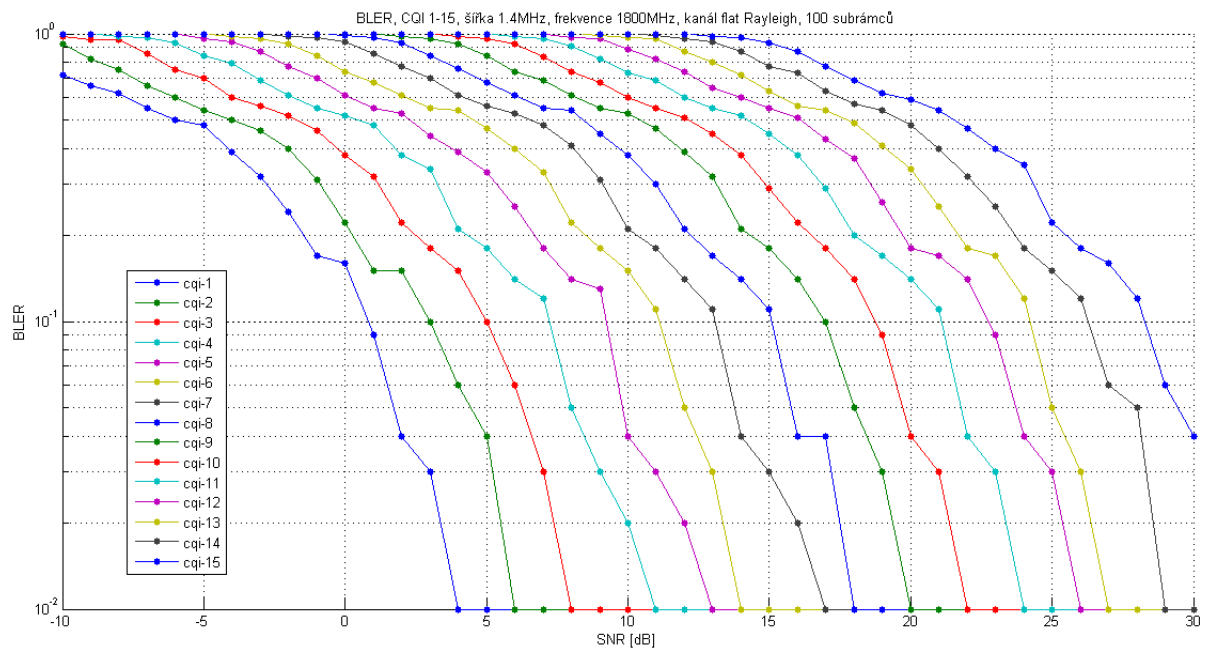
Graf T.2: Chybovost



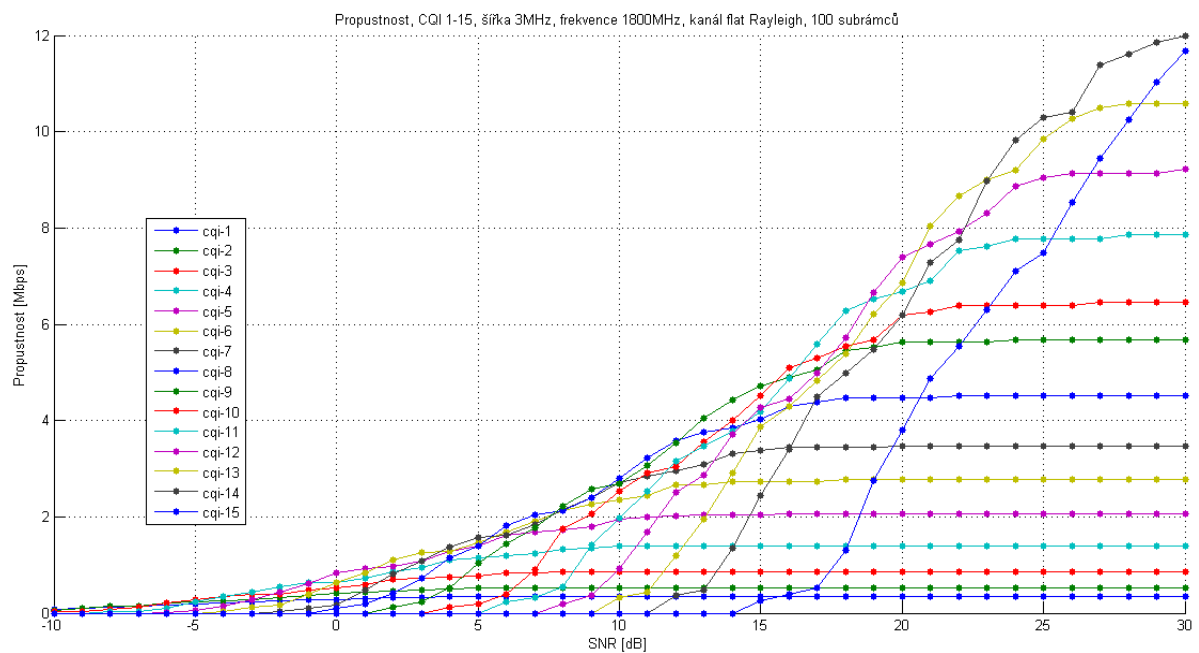
Graf U.1: Propustnost



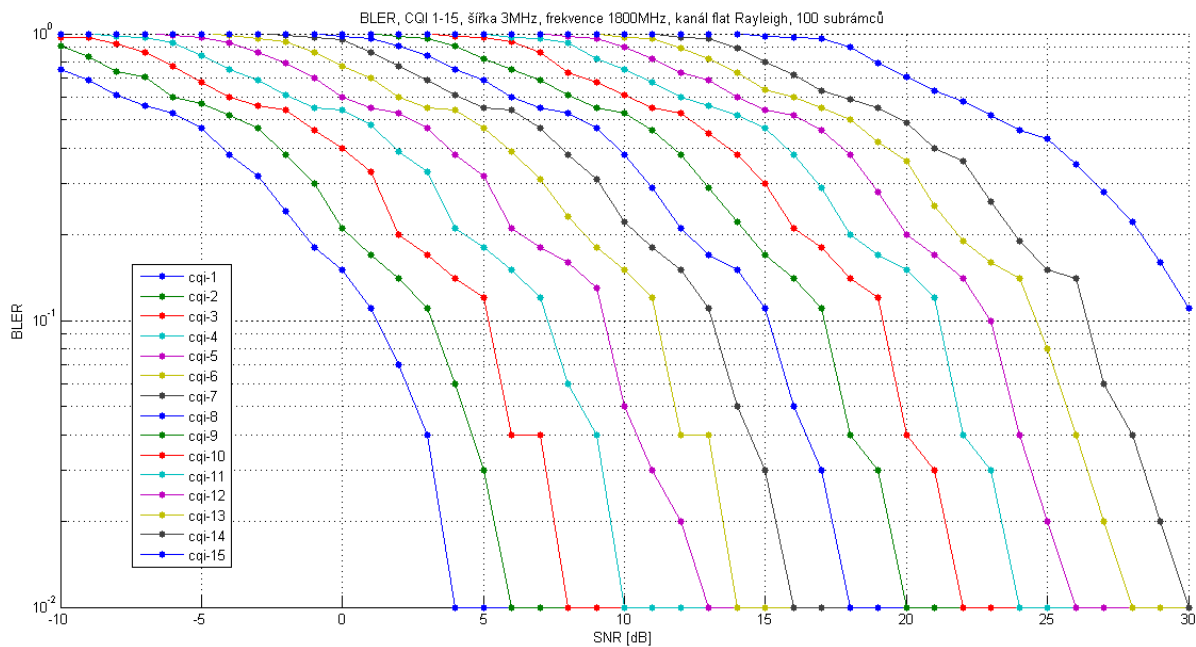
Graf U.2: Chybovost



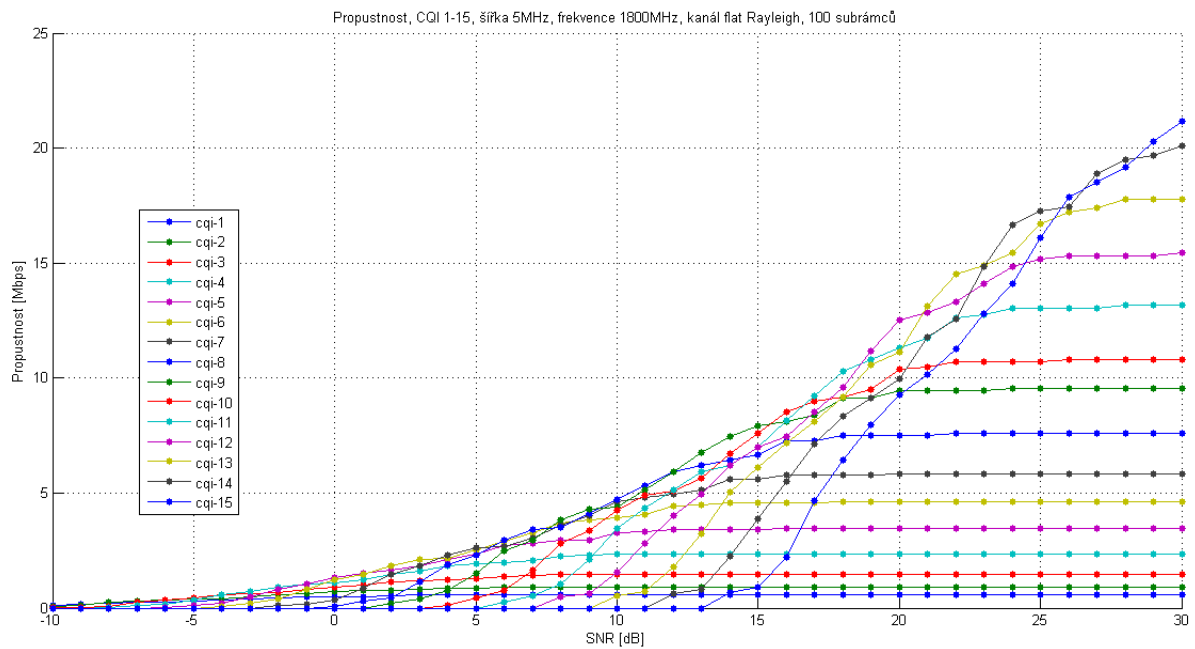
Graf V.1: Propustnost



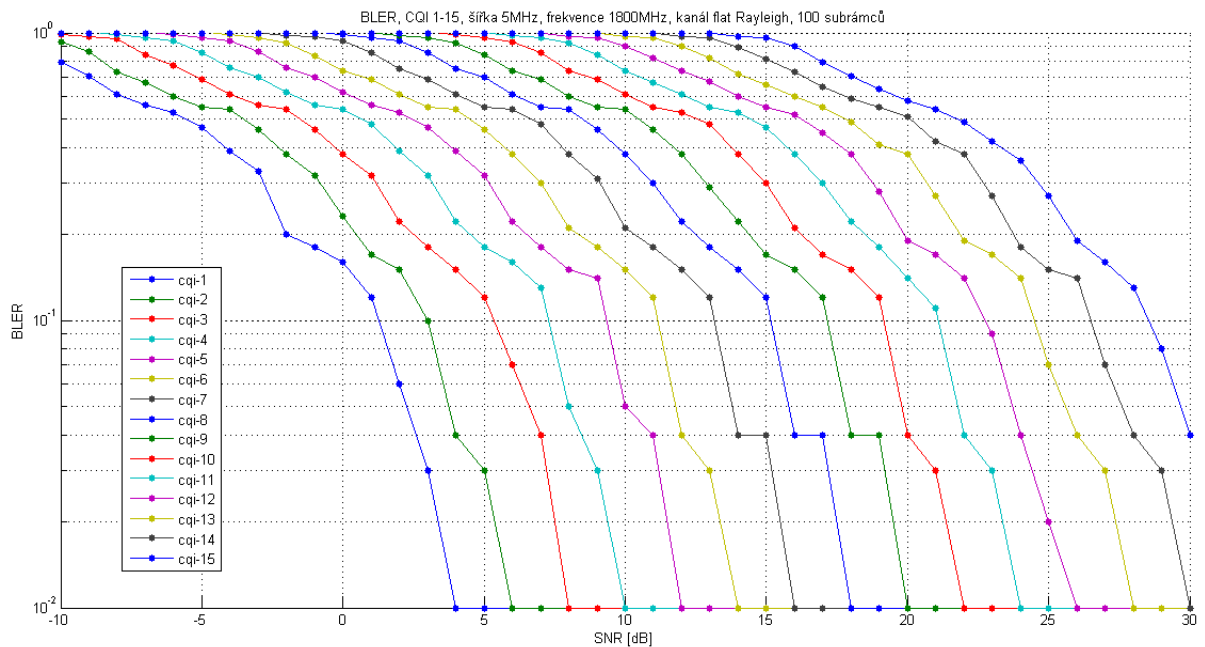
Graf V.2: Chybovost



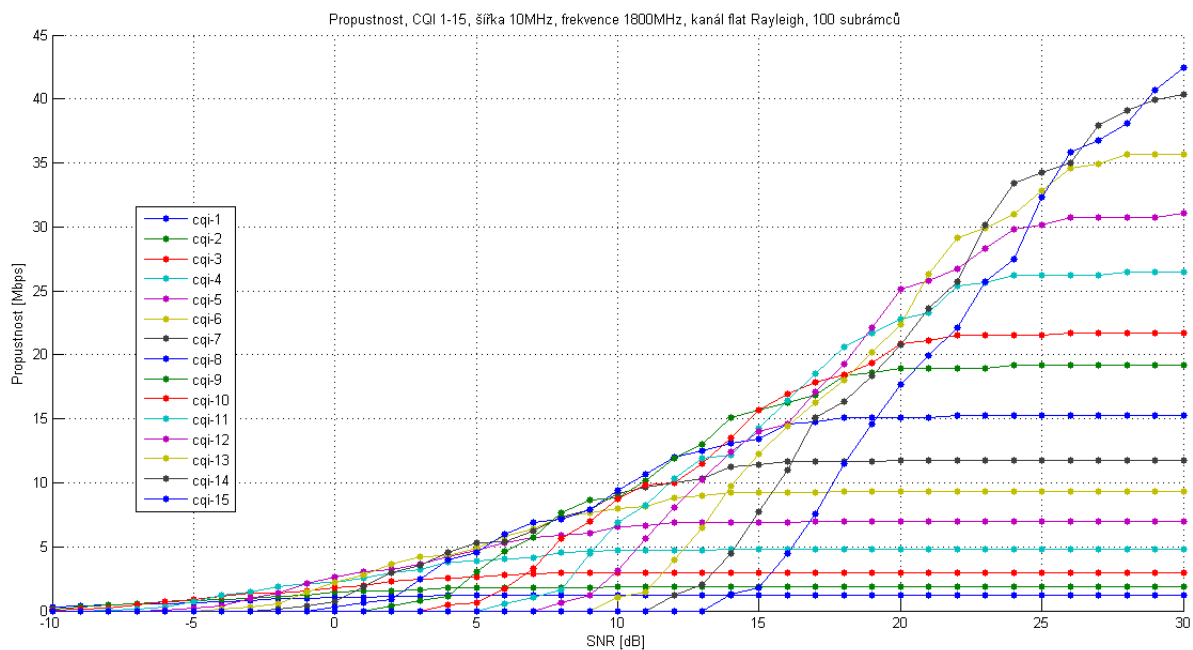
Graf W.1: Propustnost



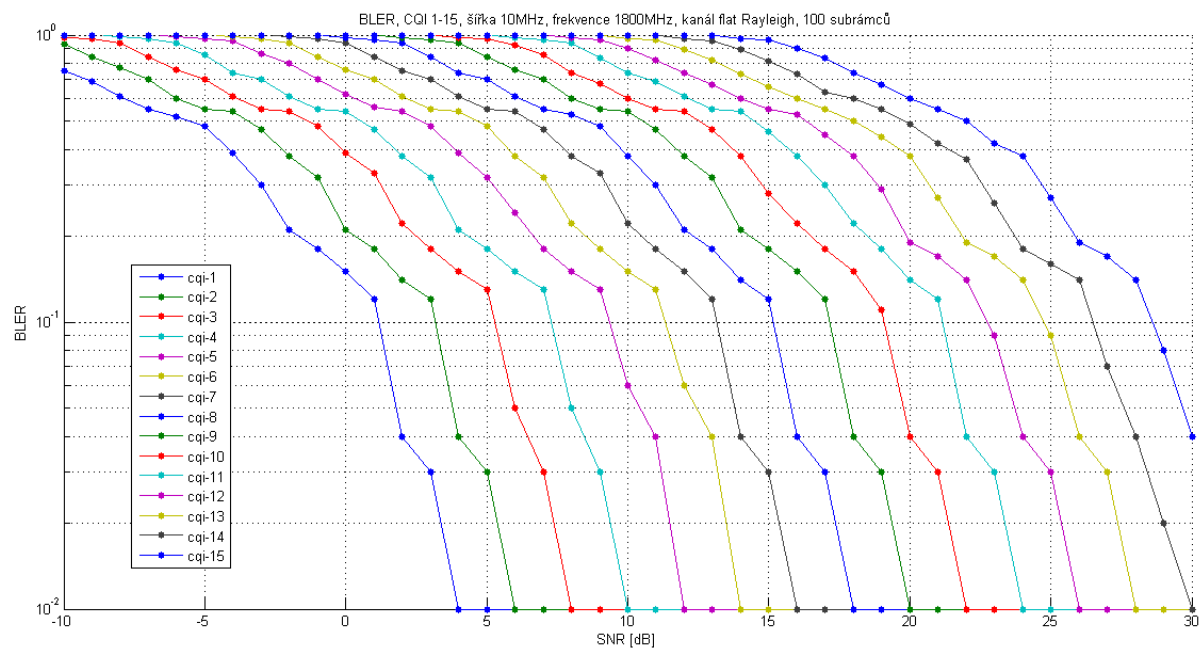
Graf W.2: Chybovost



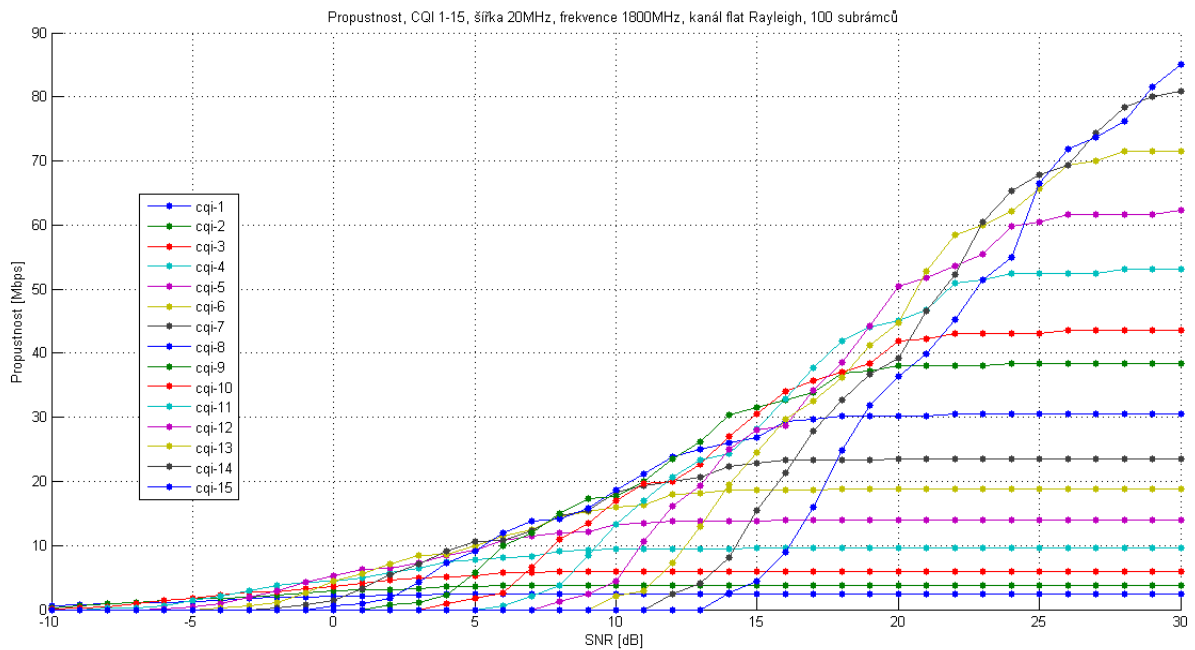
Graf X.1: Propustnost



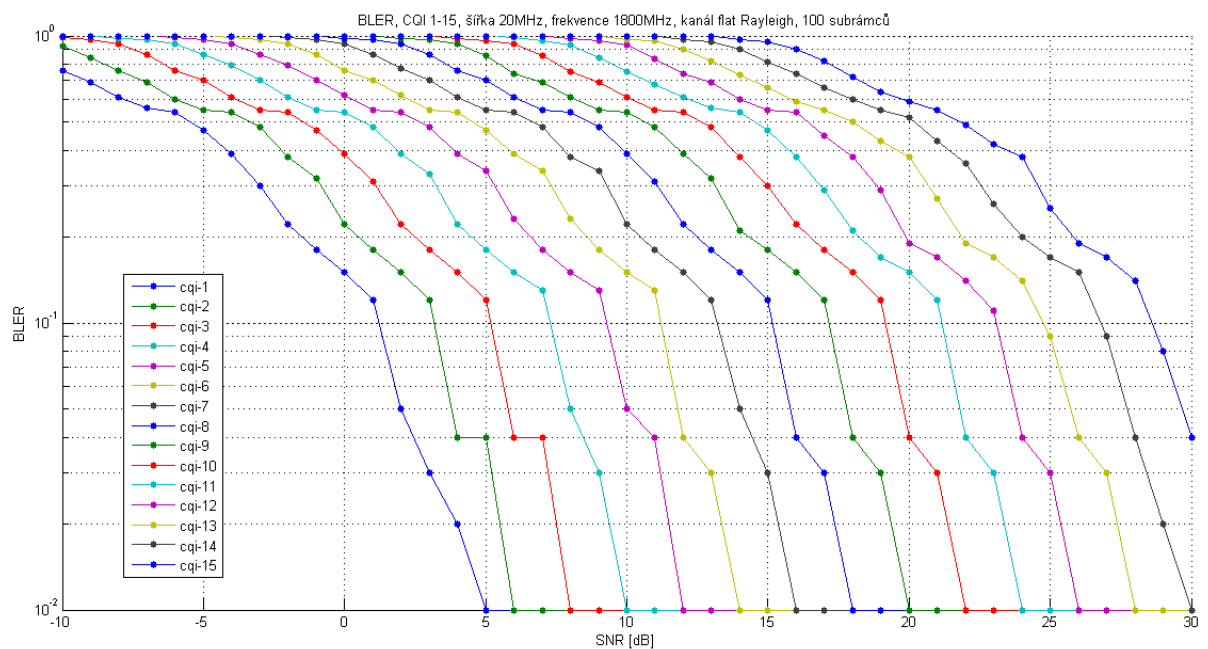
Graf X.2: Chybovost



Graf Y.1: Propustnost

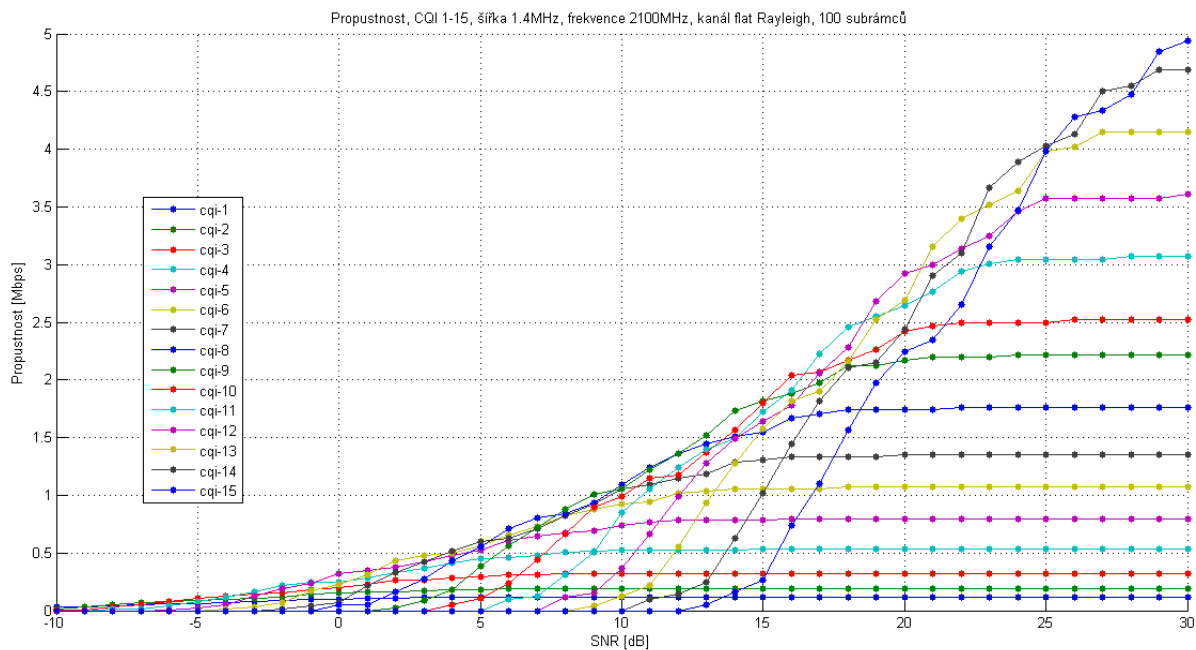


Graf Y.2: Chybovost

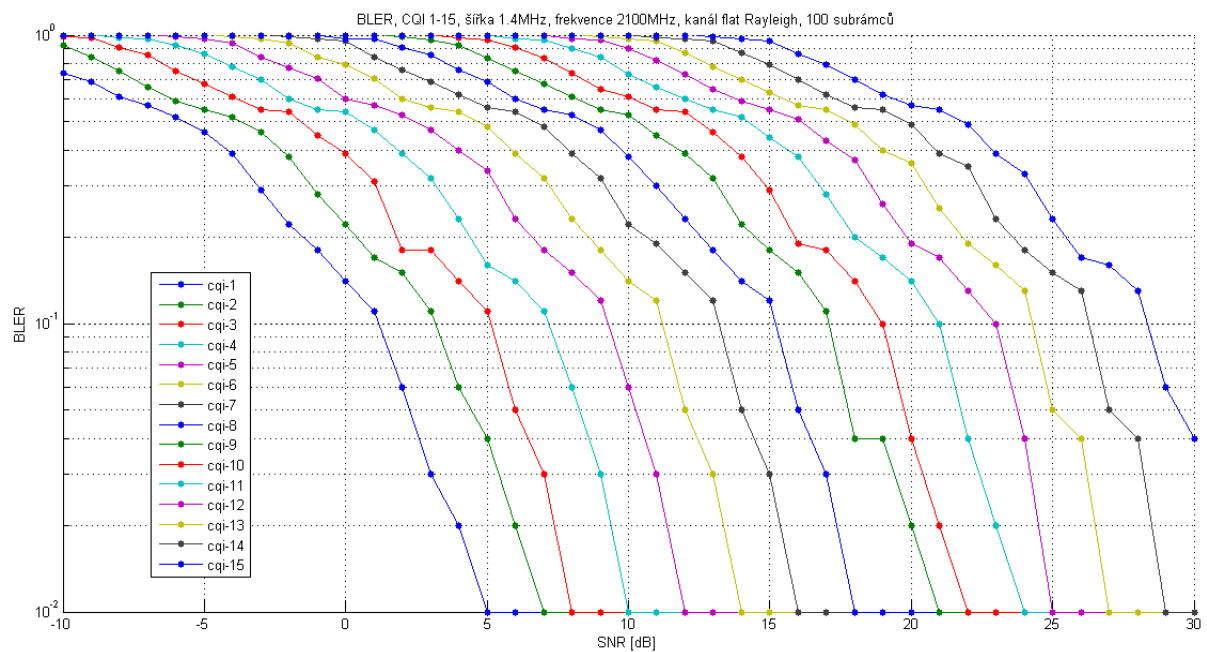




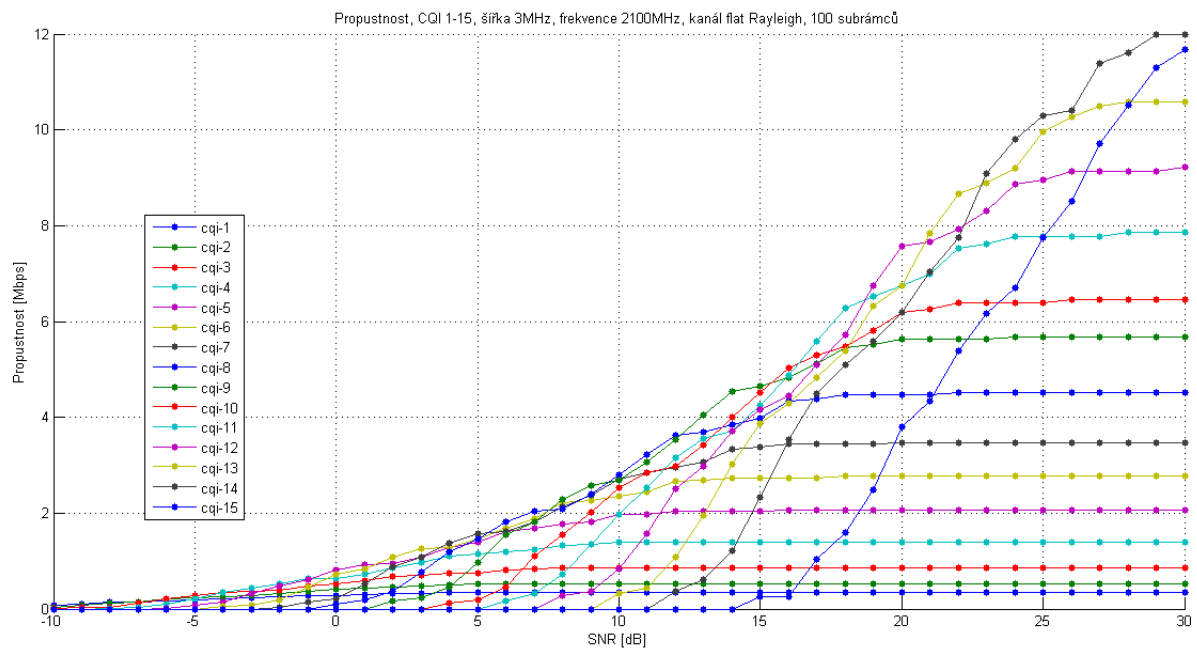
Graf Z.1: Propustnost



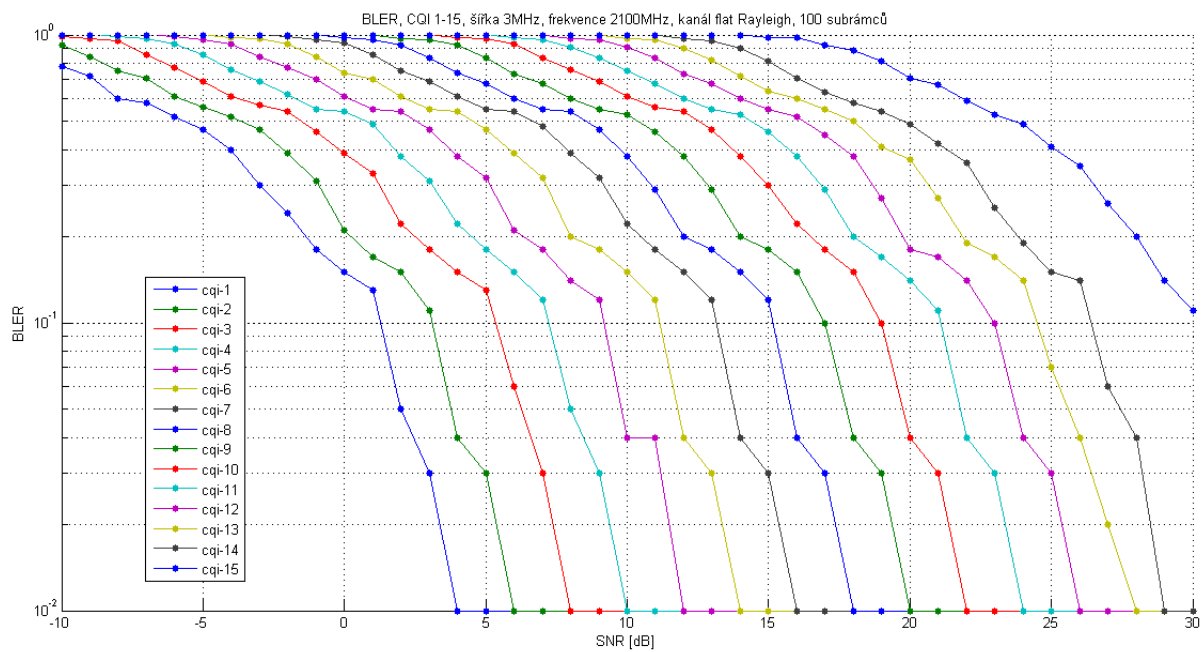
Graf Z.2: Chybovost



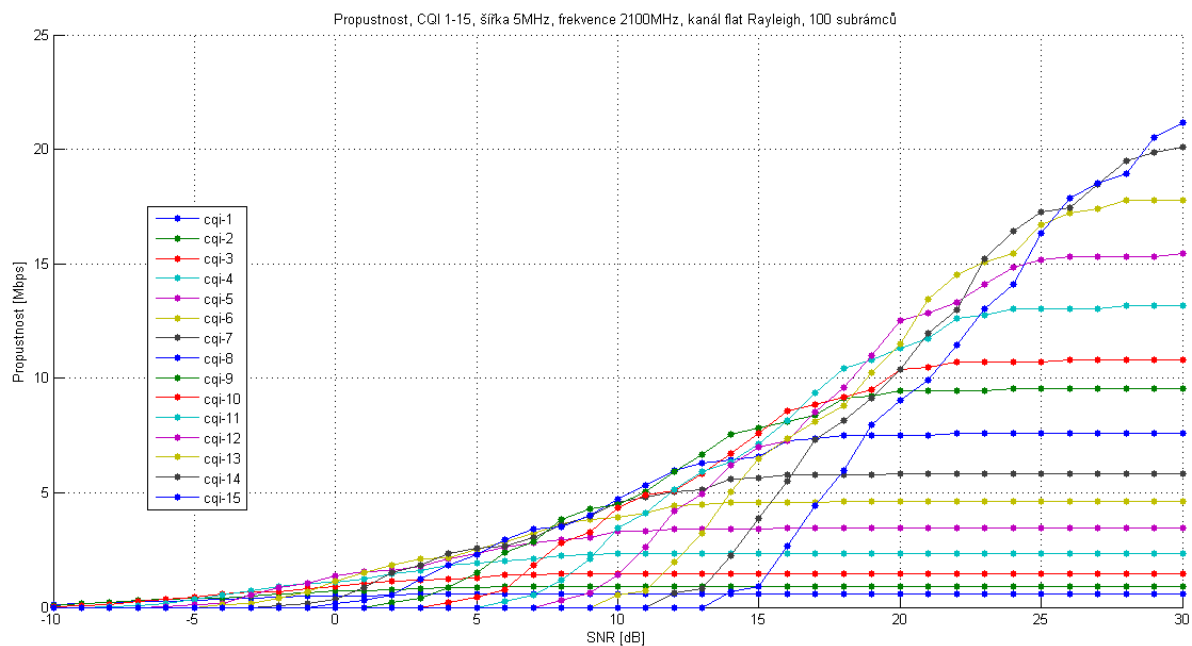
Graf AA.1: Propustnost



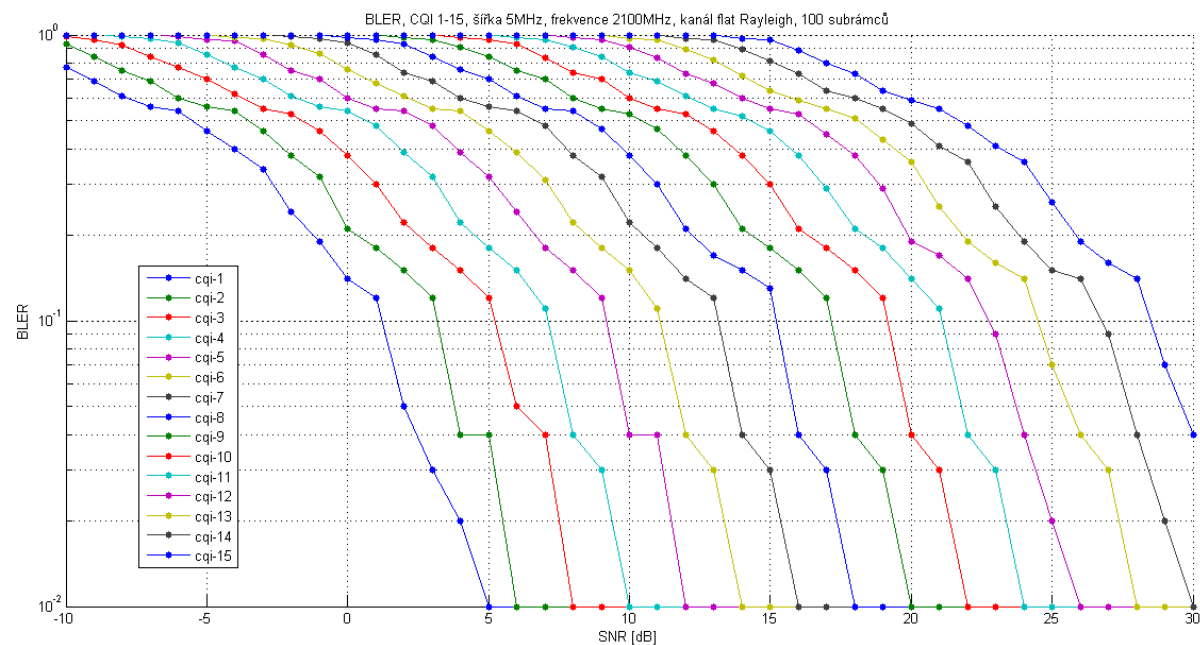
Graf AA.2: Chybovost



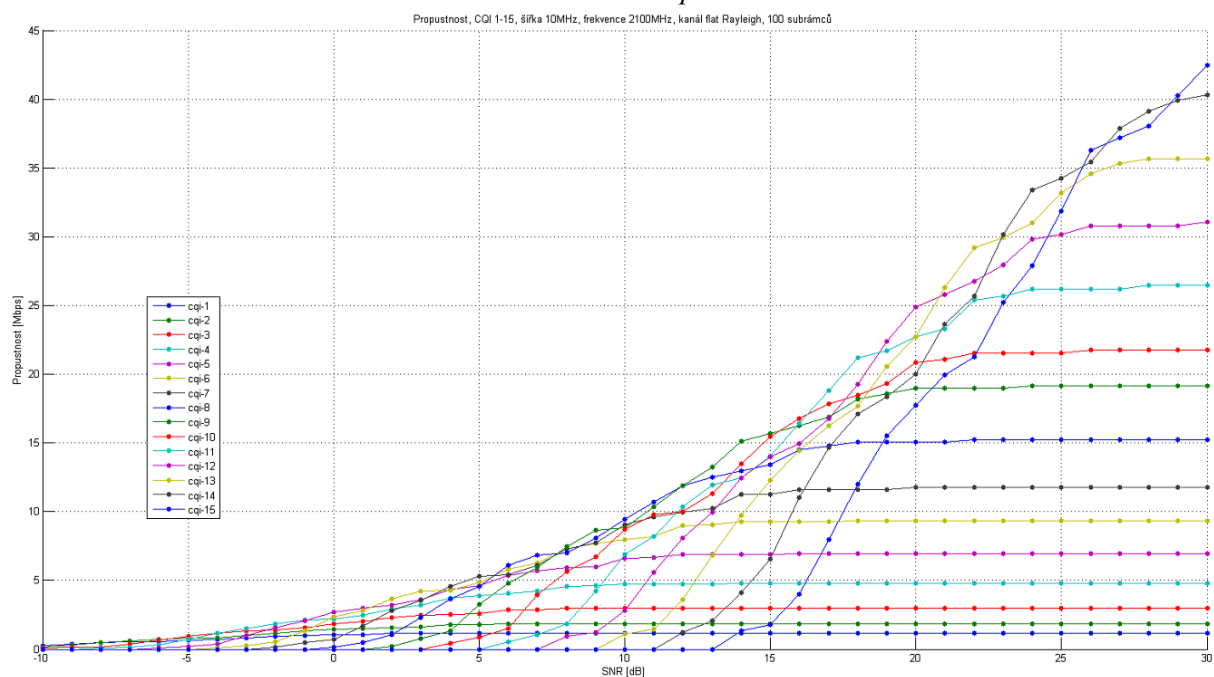
Graf BB.1: Propusnost



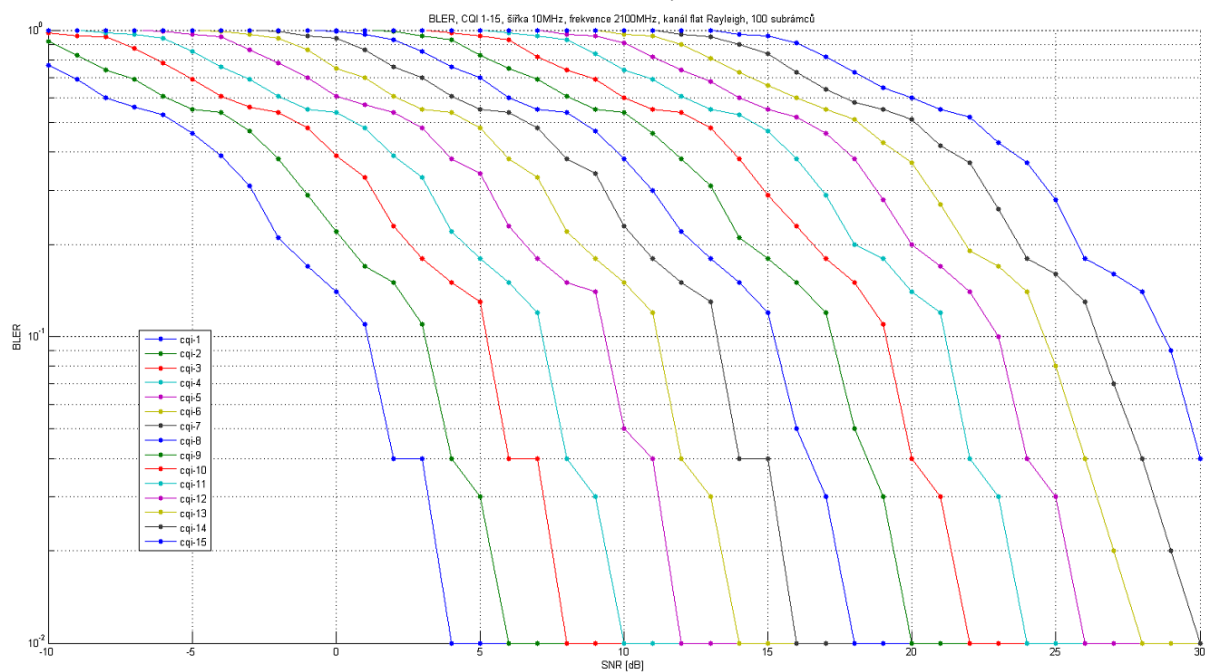
Graf BB.2: Chybovost



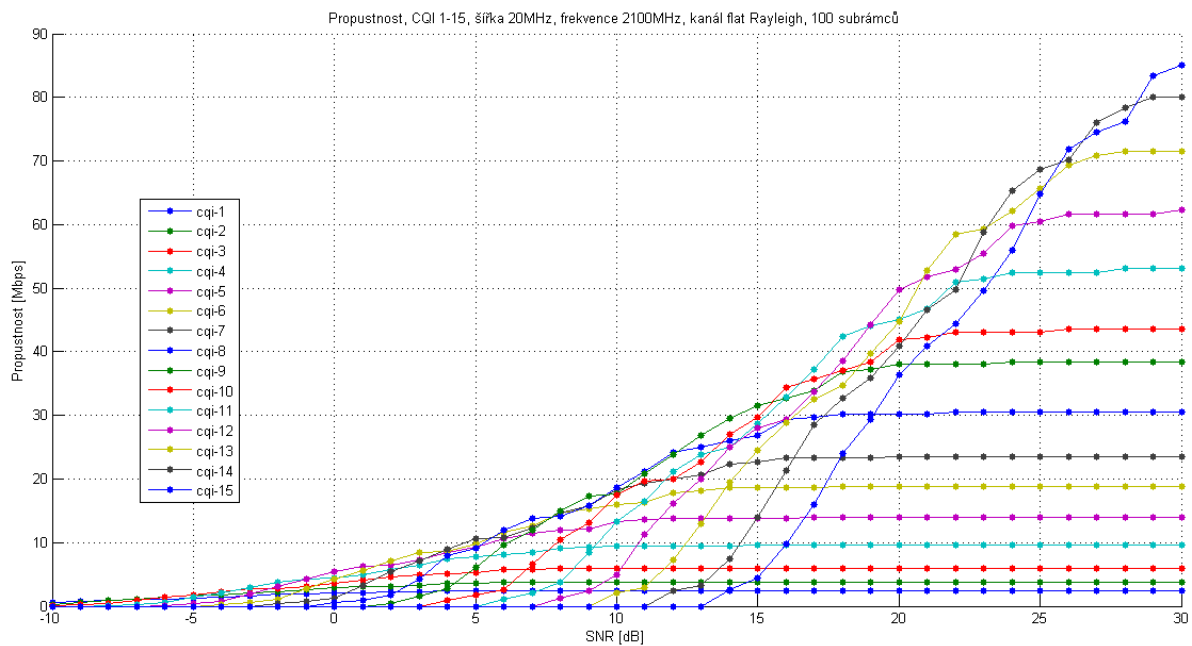
Graf CC.1: Propustnost



Graf CC.2: Chybovost



Graf DD.1: Propustnost



Graf DD.2: Chybovost

